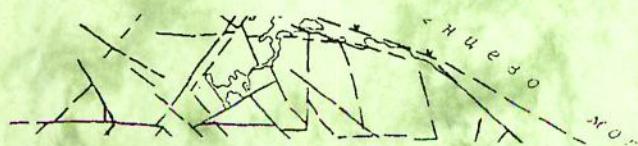
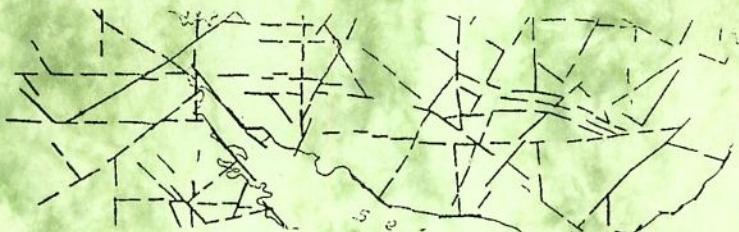


Федеральное агентство по образованию
Филиал ГОУ ВПО «Костромской государственный университет
им. Н.А. Некрасова» в г. Кировске Мурманской области

Тряпицын В.М., Шабаров А.Н.



СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА ХИБИН



Кострома
2007

Федеральное агентство по образованию
Филиал ГОУ ВПО «Костромской государственный университет
им. Н.А. Некрасова» в г. Кировске Мурманской области

Тряпицын В.М., Шабаров А.Н.

**СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНИКА
И ГЕОДИНАМИКА ХИБИН**

Кострома
2007

ББК 26.309.3

УДК 552.2

Т 809 Печатается по решению Ученого Совета Филиала ГОУ
ВПО «Костромской государственный университет
им. Н.А. Некрасова» в г. Кировске Мурманской области

Авторы:

Тряпицын В.М., Шабаров А.Н.

Т 809
Тряпицын В.М., Шабаров А.Н.
Современная тектоника и геодинамика Хибин. Моно-
графия. – Кострома: Авантигл, 2007. – 146 с.
ISBN 978-5-98342-057-1

Данная монография представляет интерес для специалистов, может быть использована для решения практических задач не только в горно-рудной промышленности, но и при выборе мест заложения ответственных, потенциально опасных объектов. Полезной она может быть и в гражданском строительстве.

ББК 26.309.3

ISBN 978-5-98342-057-1

© Тряпицын В.М.,
Шабаров А.Н., 2007
© ФГОУ ВПО КГУ
им. Н.А.Некрасова, 2007
© Авантигл, 2007

I. ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА

Современные геотектонические концепции предполагают существование тектонически активных шовных зон на стыке литосферных плит различного ранга, в зависимости от их протяженности, глубины проникновения и величины деформаций. К таким шовным зонам могут быть отнесены зоны спрединга океанической коры, сопровождаемого образованием мировой рифтовой системы, зоны субдукции (поддвигания или надвигания литосферных плит), зоны современных континентальных рифтов и т.д. Выделяются и зоны современного складко- и горообразования, к которым в Европии относится Альпийский горно-складчатый пояс.

В качестве исходных данных для анализа геологических структур региона в работе использованы изданные международные карты масштабов 1:2500000 и 1:15000000, 1983 и 1986 г.г. издания, представляющие собой последнее наиболее полное обобщение, основанное на новейших геологических данных и принятых, в настоящее время, концепциях.

В пределах рассматриваемого региона выделяется основная структура, обособленная в результате байкальско-калевских деструктивных процессов, носящая название Балтийский щит. С севера, юга и юго-востока Балтийский щит ограничен структурами с докембрийской и палеозойской складчатостью, с земной корой континентального типа, которые развиты в пределах обрамляющих акваторий Атлантики и окраинных морей Ледовитого океана.

К северу и юго-востоку поверхность складчатого основания постепенно погружается и перекрывается чехлом фанерозойских образований Баренцевоморской и Русской плит. Граница осадочных образований, слагающих чехол, проходит по линии Финский залив – юг Ладожского, Онежского озер и Белого моря и далее, вдоль Мурманского побережья.

По северо-западной окраине Балтийского щита обнажается полоса Скандинавских каледонид, протягивающаяся вдоль Атлантического побережья, шириной до 375 км, и находящаяся в аллохтонном залегании. Шарьяжный покров каледонид залегает

на дорифейских образованиях Балтийского щита, которые прослеживаются в многочисленных тектонических окнах. Структуры Фенноскандии прослеживаются в шельфовой зоне Атлантики вплоть до континентального склона, отделяющего их от геоструктур Северной Атлантики с земной корой океанического типа. Формирование океанических структур Атлантики началось в палеоцене и продолжается до настоящего времени. По представлениям одних исследователей образование отрицательной планетарной геоструктуры Атлантики обусловлено погружением и базификацией земной коры (В.В. Белоусов). По мнению других – оно связано с раздвиганием (спредингом) земной коры в зоне Срединно-Атлантических рифтов. В центральной части Атлантики проходит Срединно-Атлантический хребет, представляющий собой современную рифтовую зону, разбитую попоречными трансформными разломами на несколько участков, смещенных относительно друг друга. По одной из них – зоне Западно-Шпицбергенского разлома, система Северо-Атлантических рифтов отделена от продолжающей ее Арктической рифтовой системы, проходящей к северу от острова Шпицберген.

Таким образом, Восточно-Европейская дорифейская платформа на северо-западе по системе разломов граничит с океанической плитой Северной Атлантики, на севере и северо-востоке системой Мурманского-Тиманских разломов она отделена от Шпицберген – Баренцевоморско – Тиманской плиты, на юго-западе по системе разломов граничит с палеозойскими структурами Западной Европы и альпийскими структурами Карпат-Европейской шовной зоны. С юга платформа ограничена полосой герцинских структур, отделяющей ее от альпийского складчатого пояса.

Во внутренней структуре земной коры Балтийского щита выделяются Беломорский, Карельский, Кольский, Ладожский (Свекофенский) и Ботнический геоблоки.

Беломорский геоблок охватывает акваторию Белого моря, его юго-западное и северо-восточное побережье. В плане он имеет клиновидную форму.

Вдоль глубинных разломов с юго-запада и северо-востока к Беломорскому геоблоку причленяются Карельский и Кольский геоблоки. Характерной особенностью этих геоблоков является широкое развитие «гранитогнейсовых полей», создающих моза-

ичную систему блоковых структур разных порядков. Межблочные пространства являются зонами глубинных разломов и предопределают развитие структур шовного типа.

Большая часть Кольского геоблока в акватории Баренцева моря перекрыта байкальскими образованиями. На стыке с Беломорским геоблоком развита Кольская глыбово-складчатая система карелид, имеющая неоднородное строение. В ее составе выделяются Кольско-Норвежская, Кейвская и Печенгско-Варзугская зоны, в которых развиты нижнеархейские и архейские структурные этажи.

Ладожский (Свекофенский) геоблок соответствует обширной свекофенской геосинклинальной складчатой области, сформировавшейся на Карельском геоблоке. Геоблок занимает значительную территорию в юго-западной части Балтийского щита. В верхней части разреза широко развиты гранито-гнейсы, являющиеся фундаментом для геосинклинальных толщ.

Таким образом, для земной коры Балтийского щита характерно наличие крупных структурно-тектонических элементов – геоблоков, каждый из которых обладает особенностями внутреннего строения и в своем историческом развитии отчетливо проявляет автономность эволюции. При этом становление и развитие каждого более молодого по возрасту геоблока проявлялось в более древних блоках как этапы тектонической активизации.

К континентальной части Балтийского щита примыкают две крупные структуры морского дна – Северо-Баренцевоморская платформа и Южно-Баренцевоморская плита. Северо-Баренцевоморская платформа с востока ограничена молодыми кайнозойскими глубинными разломами. С запада – Поморским континентальным уступом и желобом Святой Анны, с севера – уступом Брусилова. В эту же платформу входит Скандинавско – Новоземельская складчатая система каледонид, протягивающаяся от северного побережья Норвегии к северной части Новой Земли.

Южно-Баренцевоморская плита на севере и северо-западе отделяется от Северо-Баренцевоморской платформы Скандинавско-Новоземельской складчатой системой каледонид, с северо-востока – Уральско-Новоземельской системой герцинид. С юга и юго-запада она отчленяется от Русской плиты и Балтийского щита зоной байкальской складчатости Тиман-Варангер.

1.1. ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ РЕГИОНА

Вся постпротерозойская история развития Балтийского щита характеризуется вертикальными колебательными движениями земной коры с неизменным преобладанием поднятия. Орогенические циклы – каледонский, герцинский и альпийский не внесли существенных изменений в его строение, а привели лишь к образованию новых и омоложению древних глубинных разломов, вертикальным, а в ряде мест горизонтальным перемещениям отдельных блоков земной коры и внедрению в палеозое ряда мощных интрузий. С каледонским циклом связано присоединение к Балтийскому щиту каледонских складчатых образований Норвегии.

В рамках настоящей работы история тектонического развития региона рассматривается с начала неотектонических движений.

1.2. НЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ

С завершением карельского геосинклинального тектономагматического цикла восточная часть Балтийского щита, к которой относится Кольский полуостров, приобрела типичные черты платформы, с характерными для нее структурами. С завершением третьего этапа развития карельской эпохи произошло общее поднятие территории, на фоне которого образовались отдельные впадины, где накапливались толщи терригенных осадков и вулканогенных серий.

В этот период восточная часть Балтийского щита полностью консолидируется и движения приобретают глыбовый характер, что проявилось в образовании расколов по зонам разломов более древнего заложения. Блоки различного ранга испытывали преимущественно вертикальные движения. Вследствие этого, интрузивная деятельность приобрела платформенный характер и проявилась в связи с крупными разломами земной коры различного масштаба и глубины заложения, по которым внедрялись каледонские и герцинские интрузии, окончательно завершившие эту эпоху развития.

Позднейшие мезо-кайнозойские, палеоген-неогеновые и современные контрастные движения блоков во многом предопределили макроформы щита и особенности современного рельефа его отдельных областей.

Беломорская структурная область.

В Беломорской области наряду с древними разломами на территории беломория широко развиты и более молодые, вплоть до четвертичных, дисъюнктивные нарушения. Они подчеркиваются резкой сменой положительных и отрицательных форм рельефа, конфигурацией некоторых рек и озер и другими признаками. Преимущественное простирание омоложенных разломов северо-западное, субширотное и северо-восточное, присущее направлению более древних систем [1].

В Лоттинской зоне по разломам северо-восточного простирания (Юовв-Оайский разлом Ура-губской зоны, Яuriокско-Кольский, Падосский, Юля-Алла-Акаярвинский разломы, а также разрывы в районе оз. Кацкое, Нотозеро, р. Конья и др.) осуществлялись движения с образованием взбросов, надвигов, сбросо- и взбросо-сдвигов, в связи с чем произошло поднятие смежных блоков. Эти разломы подновлялись длительное время, включая кайнозой, и отчетливо выражены в рельефе долин. [2]

В Корва-Енской зоне отмечена активизация в кайнозойское время по Яuriокскому (Северному) разлому и проявилась в виде зон дробления и милонитизации без каких-либо следов минерализации. Гирвас-Вадозерская система разломов также проявляла активность в период кайнозоя, что подтверждается наличием впадин, выполненных комплексом рыхлых отложений [2].

В Терской (Южно-Кольской) зоне в мезо-кайнозойское время альпийская система обновила все предшествовавшие ей разрывные нарушения, но не дала больших изменений в структуре и составе пород, а проявилась в образовании серий сбросов, взбросов и надвигов небольшой амплитуды. Среди таких долгоживущих зон выделена широтная Кандалакшско-Мунозерская, ширина которой составляет 5-10 км. Эта зона включает в себя Кандалакшско-Индельскую (Колвицереченскую), Мунозерско-Индельскую и Терскую системы разломов.

Кольская структурная область

В Мурманской зоне в период мезо-кайнозоя продолжалось омоложение тектонических швов, особенно меридионального направления. По широтным разломам Лотта-Себльярвско-Воронинской и Югоньской зон также происходили движения с образованием многочисленных, параллельных им разломов, не

оказывающих существенного влияния на формирование структурных форм.

Практически все сформировавшиеся ранее разломы Центрально- и Северо-Кольской зон, испытывали движения в период всего существования, включая и кайнозой.

В Имандра-Варзугской зоне в кайнозое продолжалась активизация Панской и Ильменской систем разломов, с образованием многочисленных брекчий мILONитов, без следов минерализации.

В Печенгской зоне наиболее активными в неотектонический период были зоны глубинных нарушений широтного, Северо – восточного (30° - 40°), северо-западного (300° - 320°) и меридионального простириания. Наиболее крупным и активным в это время является Порытапский (Пороярвинский) разлом северо-западного простириания. Его активизация привела к воздыманию Печенгской мульды по отношению к Порытапскому, с образованием выраженного уступа высотой до 40 м.

Активные движения в этот период отмечались по Лоттингскому северо-восточному (60° - 70°), Ламасскому северо-восточному (40° - 50°), Мехтъяурскому разломам [3]. Так Мехтъяурский разлом разделяет на два блока Печенгское рудное поле, смещения по нему достигают 30-40 м. Он хорошо выражен в рельефе, а в обнаружениях проявлен в виде зон дробления и рассланцевания пород. Главные разломы Кольского полуострова показаны на рис. 1.

Карельская структурная область

В пределах Карельской структурной области неотектонические движения проявились в зонах разрывных нарушений, отделяющих Северо-Карельский антиклиниорий от Беломорского блока, а также в разрывах, расчленяющих их на ряд крупных блоков. Зоны и отдельные системы нарушений прослеживаются на десятки и сотни километров, уходя за пределы данной территории. Ширина их колеблется от нескольких километров до десятков километров.

К востоку от оз. Топозеро широко развиты экзогенные молодые разрывные нарушения (вплоть до четвертичных) широтного простириания, которые в современном рельефе отражены резкими уступами, цепочками удлиненных озер, реками и другими элементами [4]. Среди широтных нарушений Карельской области наиболее отчетливо выражены разломы Петрозаводского грабена, относящиеся к планетарному Балтийскому поясу нарушений.

Из меридиональных разломов, проявлявших неотектонические движения, выделяются разломы Печенгско-Ладожской зоны [2]. Сложная тектоническая зона субширотного простириания (70° - 80°), к которой приурочены почти все палеозойские осадочно-эфузивные толщи и связаны герцинские интрузии щелочных пород, проявляет свою активность и в настоящее время. К западу, через систему разломов такого же направления, эта зона соединяется с грабеном Осло, представляющим классическую область проявления разрывных дислокаций. Вяюрюнен Х. [5] считает, что в пределах Балтийского щита весь этот пояс характеризуется повышенной сейсмичностью, связывая воедино Кольские массивы с пермской эруптивной площадью района Осло.

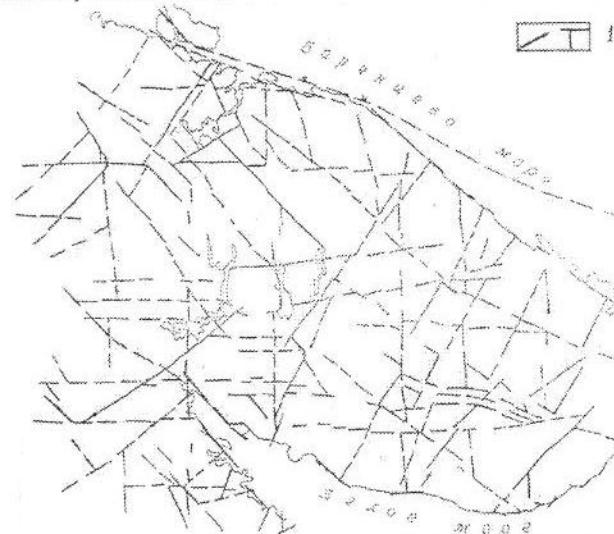


Рис. 1. Главные глубинные разломы Кольского полуострова (по В.А.Перевозчиковой) 1 – зоны главных разрывных нарушений

На Кольском полуострове эта зона восток-северо-восточного направления разбита системой поперечных разломов (Имандровский, Умбозерский, Ловозерский) на ряд блоков (Хибинский, Ловозерский, Контозерский), разделенных тектоническими выступами докембрийского фундамента.

1.3. ПОСЛЕДНИКОВЫЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Исследования новейшей и современной тектоники Балтийского щита показали, что движения проявлялись неравномерно в пространстве и во времени. Большинство исследователей считало, что послеледниковое поднятие связано с гляциоизостатической компенсацией земной коры. Новейшая структура при этом представлялась в виде сводового поднятия с максимумом в его центральной части. Полагалось при этом, что восходящие движения не прекратились, а лишь замедлились.

Высокоточные гравиметрические наблюдения, проводимые в период 1966-1984 годов по четырем линиям профилей, наглядно свидетельствуют о распределении скорости поднятия Фенноскандии, рис. 2 [6].

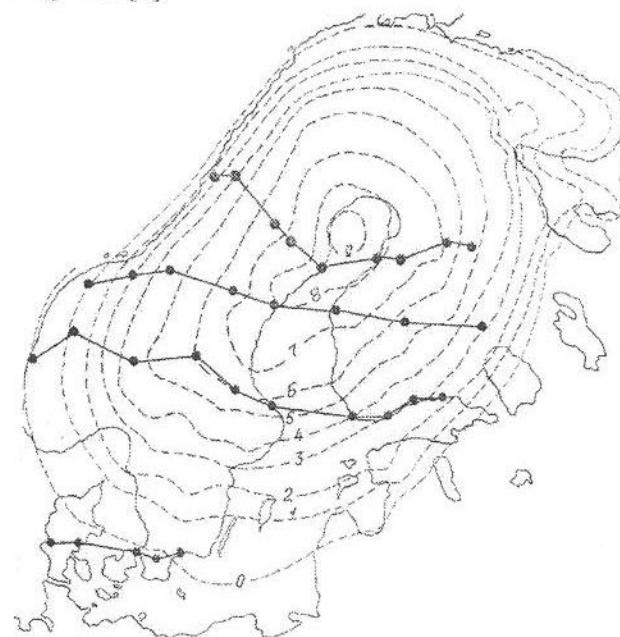


Рис. 2. Современная скорость поднятия Фенноскандии (по Makinen et al.). Изолинии проведены через 1 мм/год, т.е. через 1 Бубен.

Однако, по вопросам соотношения гляциоизостатической и тектонической составляющих, вызывающих сводовое поднятие Балтийского щита в послеледниковое время, видимо, следует со-

гласиться с Ю.А.Мещеряковым [7], который полагал, что сразу же после стаивания ледника преобладала изостатическая составляющая. С течением же времени, через 5000-7000 лет, основное влияние на менее интенсивные, но устойчивые движения, оказывали тектонические факторы. В настоящее время блоки земной коры принимают участие в общем сводообразном поднятии и, в то же время, испытывают дифференцированные вертикальные движения.

Такие представления подтверждают многие работы, основанные на анализе имеющихся данных о глубинном строении земной коры, сейсмичности и геоморфологических данных, которые свидетельствуют о том, что новейшие и современные тектонические движения на Балтийском щите проявляются неравномерно, дифференцированно, наследуют многие черты древних тектонических структур и отражаются в рельфе. Так, например, в работе [8] показаны современные разломы на территории Фенноскандии, протяженность которых достигает 155 км, амплитуда смещений составляет 8-12 м, а глубина заложения – 10 км. По возрасту автор относит их к послеледниковым. Местоположение разломов показано рис. 3.

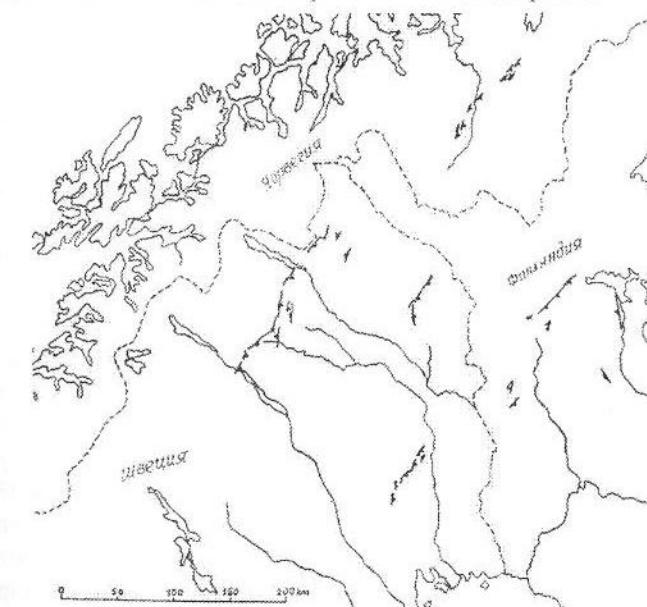


Рис.3. Современные разломы на территории Фенноскандии (по Robert M. Wood). Разломы показаны линиями с бергштрихами.

Морфоструктурный анализ поверхности Кольского полуострова показывает, что вся система разломов, отражающаяся в современном рельефе, приближенно укладывается в сочетание ортогональных и диагональных направлений и определяется расположением речной сети и линеаментов различных рангов. Проявления разрывной тектоники установлены практически всюду. Их возраст, судя по возрасту даек, наличию или отсутствию моренных отложений в трещинах, колеблется в широких пределах. Ряд генераций разрывных нарушений связан с поздне и послеледниковыми движениями.

Новейшие подвижки выражаются как в обновлении древних зон дробления, так и в заложении новых. Чертежи несоответствия элементам древней структуры указывают на отличие плана новейших движений от более ранних.

Разломы, хорошо подтвержденные материалами геологической съемки и геоморфологических наблюдений, ограничивают многие массивы. Так, блок Печенгских тундр ограничен с юга зоной Порыташ-Кучинтундровского глубинного разлома. Блок горных Кейв ограничен с северо-востока Северо-Кейвским глубинным разломом, а на юго-западе граница этой структуры соответствует положению Панско-Бабьозерского разлома. Ряд разломов, заложенных в архее-протерозое, устанавливается по периферии Хибинского и Ловозерского блоков [9]. Почти все эти разломы имеют признаки обновления в поздне- и послеледниковый период.

Анализ древнебереговых линий по долинам Паза, Печенги, Колы, Туломы, Кольского залива в сочетании с наблюдениями над высотным положением поздне- и послеледниковых морских террас, позволил составить схему молодых движений [10].

Между полуостровами Средний и Рыбачий отмечено смещение позднеледниковых береговых линий. Кроме вздымания Хибинских и Ловозерских тундр установлены интенсивные поднятия системы горных массивов Туадаш-тундра, Сариселян-тунтури, Колвицких тундр [11, 12].

Анализ изменения скорости поднятия суши в районе Кандалакши показал, что к атлантическому времени (6-7 тыс. лет назад) отмечено замедление темпа и последующее ускорение, которое связано с чисто тектонической природой движений. В направлении простирации Кандалакшского залива прослеживается зона молодых разломов [12].

На территории Карелии основные черты структурного плана определяются наличием трех сложных горстов (Северо-Карельского, Западно-Карельского и Восточно-Карельского), сложной, опоясывающей их области (Центрально-Карельской) и грабенов (Ладожского, Онежского и Беломорского), расположенных на границе Балтийского щита и Русской плиты.

Горсты характеризуются маломощным (0 – 7 м) покровом четвертичных отложений, в составе которых присутствует только морена последней ледниковой эпохи и позднепоследниковые образования. Внутреннее строение их усложнено серией простых горстов, грабенов, блоков, структурных ступеней.

Центрально-Карельской зоне присуща контрастная геологическая и геоморфологическая обстановка, характерны линейные формы рельефа, параллельный план гидрографической сети, с преимущественно северо-западным (300°-330°) простиранием и широким развитием водно-ледниковой эрозии. Суммарная амплитуда деформаций за новейшее время составляет до +150 м.

Многочисленные зоны глубинных разломов (Ладожско-Крестцовская, Карельская, Беломорская, Южно-Карельская) отчетливо прослеживаются по полосам линейных магнитных аномалий и зонам высоких градиентов региональных магнитного и гравитационного полей. Как правило, они размещаются на границах блоков с разной мощностью земной коры [13]. Разрывные дислокации, активизированные новейшими движениями, выражены в рельефе и условно разделены на три группы: зоны региональных разломов глубинного заложения, разломы и расколы фундамента, зоны дробления и рассланцевания.

Среди новейших локальных структур на территории Карелии выделяются: горсты, сопряженные с горстово-антиклинальными выступами фундамента карелид (Койкарский, Ругозерский, Тунгудский, Остерский), имеют в плане изометрическую или удлиненную форму, ориентированную в северо-западном направлении; горсты, сопряженные со среднепротерозойскими наложенными мульдами (Янгозерский, Западно-Онежский), имеют более сложное внутреннее строение. В рельефе выражен в виде возвышенных участков с резко расчлененным рельефом; горсты, сопряженные со среднепротерозойскими грабен-синклиналями и приразломной Чирко-Камской синклиналью, выражены в рельефе в

виде узких, отчетливо линейных гряд, ограниченных уступами высотой до 20-40 м. Отрицательные новейшие локальные структуры представлены преимущественно различной формы грабенами. В пределах Ладожского синклиниория характер новейших тектонических движений унаследованно-дифференцированный, наблюдаются многочисленные следы и признаки молодых сейсмодислокаций голоценового возраста как в пределах самого Ладожского грабена, так и по линиям крупных разломов.

Вдоль северного берега оз. М. Янисярви, на острове Валаам, в ряде заливов северного Приладожья отчетливо проявляются молодые тектонические нарушения голоценового возраста и следы пологоледниковых сейсмодислокаций. Северный край Ладожского синклиниория отделяется от Фенно-Карельского поднятия мощным тектоническим швом, осложнен наложенной мульдой оз. М. Янисярви и представляет собой синклинальную структуру западного-северо-западного простирания. Структура мульды осложнена серией субпараллельных разломов с амплитудой смещения в десятки метров.

Четко выраженный в рельфе кряж Ветреного пояса сформировался, в основном, за счет тектонических движений. На современный гипсометрический уровень он выведен новейшими тектоническими движениями. В последнюю ледниковую эпоху он испытывал вздымание, благодаря чему оказался крупным водоразделом.

В Онежской мульде тектоника проявилась по разломам северо-западного простирания, по которым встречаются крутые, почти вертикальные уступы высотой до 80 м, имеющие следы неотектонических подвижек. Во многих разломах Заонежья выявлены следы проявления молодых, голоценовых сейсмодислокаций. Ступенчатые сбросы, омоложенные новейшими тектоническими движениями, свидетельствуют о грабенообразном опускании западного берега Онежского озера. Наличие новейших тектонических движений в котловине Онежского озера подтверждается и физическими методами исследований. Так в районе «региональной флексуры Полканова А.А.», рассекающей котловину озера как бы на две части, происходит смена знака регионального гравитационного поля. К северу от нее имеют место отрицательные движения, к югу – положительные. Известно, что на территории Балтийского щита гравитационные аномалии наблюдаются на участках, испытавших движения положительного знака. Общая суммарная деформация массива составила около 200 м [14].

Инструментальные наблюдения за современными движениями на Балтийском щите подтверждают наличие дифференцированных поднятий. На территории Кольского полуострова и Карелии в различные годы было заложено несколько геодезических полигонов, по которым периодически осуществлялись прецизионные нивелировки. Такими полигонами являются: линия нивелирования 1 класса Кандалакша – Ковда, протяженностью 104 км; геодезический полигон в районе Кольской АЭС, общая длина трассы которого составляет 18 км; нивелировочные линии Титан – Кировск – Кукисумчорр, протяженностью около 20 км; геодезический микрополигон в Дальних Зеленцах.

Многолетние наблюдения показали, что на указанных полигонах отмечаются дифференцированные восходящие движения, средняя скорость которых составляет 1-2 мм/год. Максимальная скорость поднятия отмечена в районе Хибинского массива и достигает на отдельных участках геодезического профиля 45-47 мм/год, в районе Кольской АЭС дифференцированные восходящие движения составляют 1,5-2,0 мм/год, в Дальних Зеленцах – 2,6 мм/год. Результаты нивелирования по линии железной дороги Мурманск – С.-Петербург и морские уровневые наблюдения дают значения скорости поднятия от 2,5 до 4,5 мм/год. Результаты геодезических наблюдений, проводимых ГИ КНЦ РАН, изложены в работах [15, 16, 17, 18, 19].

1.4. СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА

С учетом имеющихся данных о землетрясениях региона (Рис. 4) и анализа геологических структур по материалам международных тектонических карт наибольшая сейсмическая активность отмечается в связи со следующими геоструктурами:

- Атлантическо-Арктический рифтовый пояс, в пределах которого отмечается не только большое количество землетрясений, но часто проявляются и сильные землетрясения, максимальная магнитуда которых составляет 6,4-6,6. Глубина очагов не превышает 33 км.

- Атлантическо-Фенноскандийская-Западно-Шпицбергенская зона приурочена к Атлантическо-Фенноскандийскому побережью и к континентальному склону. На севере она переходит в Западно-Шпицбергенскую зону поперечных трансформных сдвигов, ухо-

дящих к северным берегам Гренландии. На юге прибрежная зона сейсмичности изменяет простирание, проходя вдоль разломов юго-западной границы Восточно-Европейской платформы (Европейская шовная зона). К этому изгибу приурочена наибольшая сейсмическая активность.

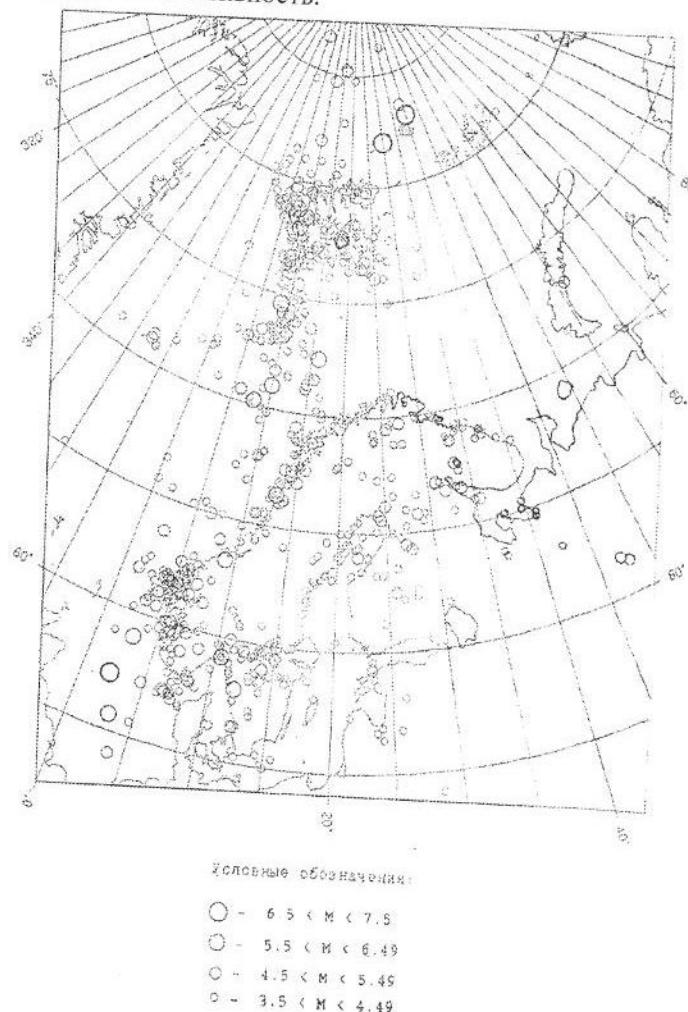


Рис. 4. Распределение землетрясений Фенноскандии с $M > 4$ за 1375 – 1992 годы.

Анализ распределения очагов землетрясений по глубине позволяет выделить две линейные глубокофокусные подзоны в пределах Атлантико-Фенноскандийской зоны. Одна из них совпадает с линией побережья и простирается скандинавских каледонид, а другая с границей континентального склона. Сочетание двух, наклонных навстречу друг другу сейсмофокальных структур, образует систему современного горста, надвигающегося на континент и океан одновременно. Аналогичным образом, видимо, ранее сформировалась система шарьяжных пластин Скандинавских каледонид.

Данная надвиговая структура хорошо согласуется со структурой тылового раздвигания океанической коры в системе Срединно-Атлантических рифтов и со сдвиговым характером смещений по зоне Западно-Шпицбергенского трансформного разлома.

- Северо-Шпицбергенская зона сейсмичности прослеживается в субширотном направлении к северу от о. Шпицберген, вдоль линии континентального склона. Максимальная наблюденная магнитуда землетрясений составляет 6,6 при максимальной глубине 30-40 км.

- Восточно-Шпицбергенская зона рассеянной сейсмичности охватывает Западный Шпицберген и прилегающие акватории Арктики. Магнитуда максимального землетрясения составляет 6,2 при глубине около 10 км.

- Мурмано-Тиманская линейная зона прослеживается по северо-восточной границе дорифейской Восточно-Европейской платформы. С этой зоной связаны самые сильные землетрясения восточной части Балтийского щита, наблюдавшиеся на Мурманском побережье ($M=4,7$) и на южном окончании Тиманской зоны ($M=5,6$). Во внутренней структуре Фенноскандии выделяется несколько зон с относительно высокой сейсмичностью: грабен Викинг, грабен Осло, Центрально-Скандинавская, Ботническая, Мурмано-Балтийская, Ладожско-Онежская. Эти зоны выделяются как сейсмоактивные объемы рассеянной сейсмичности, контролируемые отдельными разломами.

- Грабен Викинг располагается на южной оконечности Фенноскандии в море и образован сочленением разломов прибрежной зоны, имеющих субмеридиональное простижение и, субмеридиональным западным окончанием Европейской шовной зоны.

- Грабен Осло располагается к востоку от грабена Викинг, перпендикулярно Европейской шовной зоне и, по-видимому, является системой оперяющих разломов относительно шовной зоны.

- Центрально-Скандинавская зона расположена параллельно Прибрежной зоне, к востоку от нее, и является северо-западным продолжением грабена Осло. На тектонической карте ей соответствуют два корово-мантийных разлома того же простирания.

- Ботническая зона расположена по простиранию Ботнического залива. На юге соединяется с грабеном Осло, а на севере с Прибрежной разломной зоной. Контролируется региональными разломами северо-восточного и восток-северо-восточного простирания.

- Мурмано-Балтийская зона расположена к востоку от Ботнической. На юге прослеживается по восточному побережью Балтийского моря и, далее, в северо-северо-восточном направлении до Прибрежной зоны разломов. На севере зона разветвляется на две ветви – субмеридионального и северо-северо-восточного простирания. Зона контролируется региональным разломом того же простирания и отдельными элементами разломов северо-восточного простирания.

- Ладожско-Онежская зона расположена на востоке Балтийского щита и прослеживается от Кандалакшского залива в юго-западном направлении по слабым землетрясениям и контролируется отдельными элементами редких разломов.

1.5. СЕЙСМОГЕННЫЕ ЗОНЫ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Пространственные взаимосвязи сейсмодинамики со схемой основных поясов и зон системы сквозных разрывных нарушений описаны в работе [20] (Рис. 5), в которой показано, что главными сейсмогенерирующими структурами являются широтно-меридиональные зоны. Сейсмологические данные хорошо согласуются с материалами о современных движениях и подтверждается с линейными аномалиями электромагнитного и гравитационного полей [21, 22], свидетельствующими о накоплении энергии деформации. Однако концентрация очагов локализуется в определенных местах, где происходит регулярное высвобождение сейсмической энергии.

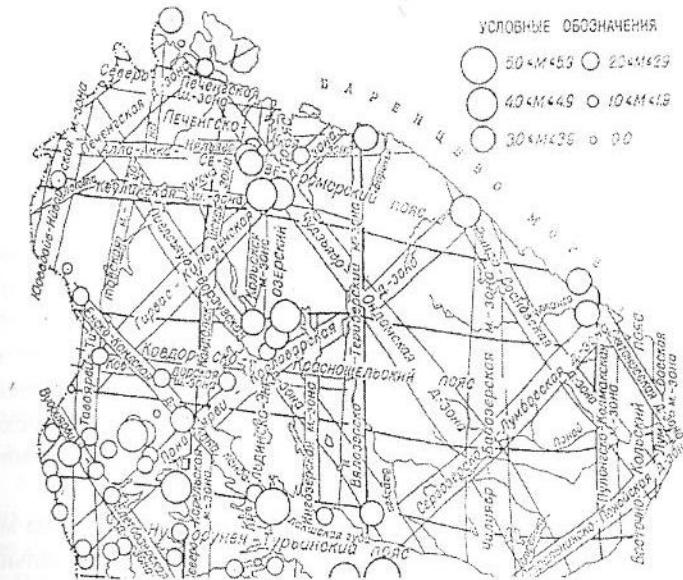


Рис. 5. Основные сейсмогенерирующие структуры Кольского полуострова (по В.В.Баржицкому)

Таковыми являются узлы пересечения разноранговых элементов системы широтного и субмеридионального направления, которые проявили себя в палеозое, послужив каналами для внедрения щелочных интрузий.

Одним из главных таких узлов является Кильдинско-Печенгский, где произошло 8 землетрясений, два из которых имели магнитуду больше 5. К этому району приурочены наиболее значительные палеосейсмодислокации Кольского полуострова [41]. Второй узел сейсмической активности – Кильдинско-Ковдорский, характеризуется неглубокими (менее 10 км) землетрясениями Хибинского массива. Третий – Кильдинско-Нуоруненский – совпадает с Кандалакшским грабеном, к которому относятся наиболее сильные исторические и современные землетрясения. Последнее, наиболее крупное землетрясение в Кандалакшском заливе произошло 20 мая 1967 года и вызвало семибалльные сотрясения в северной части Карелии. Его магнитуда $M=5,8$.

Имеющиеся данные о сейсмичности восточной части Кольского полуострова свидетельствуют о приуроченности очагов землетря-

сений к пересечениям широтными зонами Восточно-Кильдинского пояса, по определению механизмов очагов двух, наиболее сильных землетрясений региона, произошли подвижки типа взбросо-сдвиг. Горизонтальная составляющая максимального сжимающего поля напряжений имеет северо-восточное направление. По предварительной оценке сброшенные напряжения достаточно велики и превышают среднемировые значения для таких магнитуд [24].

Анализ показывает, что современная геодинамика восточной части Балтийского щита определяется проявлением активности поясов и зон сквозьструктурной системы разломов, характеризующейся цепочками землетрясений вдоль ее элементов и их концентрацией в узлах пересечения. Наибольшая активность присуща зонам широтного простирания, по которым происходит основная разрядка усилий сжатия и наблюдаются современные малоамплитудные блоковые вертикальные перемещения.

Сейсмичность зоны Мурманского берега обусловлена молодыми и современными дифференцированными вертикальными перемещениями блоков земной коры, отмечаемыми по многочисленным геолого-геоморфологическим признакам. Считается, что секущий земную кору на всю ее мощность, который обновлен альпийскими движениями.

Относительные вертикальные перемещения с нарушением ледниковых и более молодых отложений отмечены в Варангер-фирорде, между материком и полуостровами Средний и Рыбачий, между островом Кильдин и материком, вдоль восточномурманского побережья.

С 1988 по 1990 год наблюдался рост сейсмической активности Мурманского побережья, который закончился после землетрясения в районе Мурманска, магнитуда его составляла $M=4,0$. Концентрация землетрясений в районе Териберского водохранилища (Рис. 6), заполнение которого началось в 1987 году, позволяет предполагать об их техногенном происхождении. В этом районе широко распространены уступы кристаллических пород с подновленными стенками, зияющие рвы и трещины. На их стенах отмечаются участки свежих неровных поверхностей со следами отрыва отдельных блоков. Подобные образования возникают при быстрых перемещениях блоков [24] и свидетельствуют о том, что в послеледниковый

период происходили землетрясения интенсивностью более 6 баллов, так как по данным работы [25] более слабые землетрясения не сопровождаются разрывами сплошности пород.

Разломы Мурманского блока изучены недостаточно и имеются лишь краткие сведения по геоморфологии. Сочленение Балтийского щита с Баренцевоморской платформой происходит в пределах верхне-протерозойской Варангер-Тиманской структуры, вытянутой в северо-западном направлении. Основным структурным элементом ее является Предтиманская система тектонических нарушений (разлом Каршинского), который на суше прослеживается по линии Тролл-Фьорд – Комагельвен полуострова Варангер, перешеек между полуостровами Средний и Рыбачий, Главный Тиманский разлом, а в акватории хорошо прослеживается по геофизическим данным [26].

Харловский сейсмогенный узел лежит на сочленении Цагинских тектонических нарушений и разлома Каршинского и проявляет себя землетрясениями с магнитудой около трех.

В соответствии с пространственным распределением землетрясений на Кольском полуострове можно выделить сейсмогенные зоны, приуроченные к Мурманскому и Северо-Кейвскому разломам, Кандалакшскому грабену и Хибинскому массиву.

Зона Мурманского разлома неоднородна по уровню сейсмической активности. Наибольшая активность отмечается в центральной части, где зарегистрировано землетрясение с магнитудой $M=4,5$. По ее простирианию на юго-восток активность уменьшается, а при переходе в зону Предтиманских разломов, в пределах континентальной части, сейсмические проявления отсутствуют, и лишь на юге Тиманской зоны зарегистрировано землетрясение с магнитудой $M=5,6$. Зона Северо-Кейвских разломов входит в систему Предтиманских разломов и является окраинной разломной структурой Восточно-Европейской платформы. Наибольшая сейсмическая активность наблюдается в ее центральной части, где зарегистрированы два максимальных землетрясения с магнитудой 4,8.

В пределах Кандалакшского грабена зарегистрировано немногого землетрясений, магнитуда максимального из которых составляет 5,2, а глубина очага 26 км. В Кандалакшском грабене, в отличие от грабена Осло, постоянная сейсмическая активность отсутствует, а уровень максимальных магнитуд почти на единицу меньше.

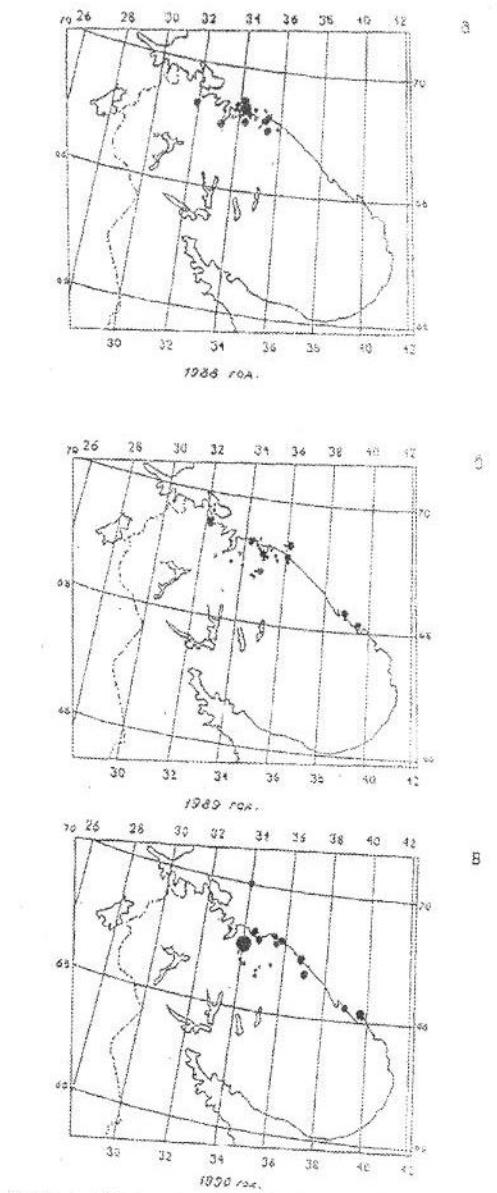


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений Мурманского побережья за 1988-1990 годы.

К северо-востоку от Кандалакшской системы разломов узкой полосой прослеживается зона высокой сейсмической активности на фоне практически асейсмичной территории. Эта зона имеет северо-восточное простиранье и располагается между двумя разломами. На севере ширина зоны повышенной сейсмичности составляет около 60 км, а к югу она ограничена Имандра-Варзугским активным разломом, проходящим южнее границы Хибинского массива. Между Ковдорским и Имандра-Варзугским разломами область сейсмической активности смещается к юго-западу, вдоль Имандра-Варзугского разлома. На участке Имандра-Варзугского разлома и в полосе самой Хибинской зоны максимальные магнитуды землетрясений варьируют в пределах 1-3,9.

Наибольшая площадь очагов землетрясений связана с Хибинским массивом, где произошло и самое сильное землетрясение, амплитуда которого оценивается различными авторами от 4,1 до 4,5. Относительно высокая сейсмичность самого Хибинского массива большинством исследователей однозначно связывается с техногенной деятельностью, обусловленной ведением крупномасштабных горных работ, в том числе созданием крупных отвалов и хвостохранилищ [27, 28, 29, 30, 31, 32]. К юго-востоку от Имандра-Варзугской зоны Хибинская зона прослеживается более узкой полосой землетрясений вплоть до Кандалакшских разломов.

Наблюдающиеся землетрясения вблизи Хибин связываются с зоной диагональных разломов и однозначно свидетельствуют о тектонической природе сейсмичности. Существующие представления однозначно связывают землетрясения с наличием разломов в земной коре и считается, что пространственно они приурочены к границам плит. Однако исследования последних десятилетий показали, что создание водохранилищ воздействует определенным образом на приповерхностную часть земной коры, в результате чего начинают проявляться землетрясения различной интенсивности и, как правило, мелкофокусные, в ранее асейсмичных районах.

Отмечено также, что при этом не только активизируются «спокойные» ранее разломы, но и происходит образование новых. Также установлены определенные зависимости изменения сейсмического режима от уровня воды в водохранилище.

Вопрос состоит в том, какова степень влияния техногенных нагрузок на земную кору для активизации сейсмичности и как предельно допустимый уровень их воздействия, при котором проявляется техногенная сейсмичность в данных условиях. Большие по объему и интенсивные горные работы по характеру воздействия на приповерхностную часть земной коры существенно отличаются от влияния водохранилищ в первую очередь закономерными нагрузками – на одних участках шахтных полей осуществляется разгрузка за счет извлечения полезного ископаемого, другие же территории пригружаются за счет образования отвалов пустой породы и хвостохранилищ. При отработке рудных месторождений для отбойки руды производятся мощные технологические взрывы, которые также влияют на поведение массивов и характер их энергообмена. Кроме того, с углублением горных работ меняется также и гидрогеологический режим в прилегающих частях массива, что в целом влияет на свойства массива.

2. БЛОЧНОЕ СТРОЕНИЕ ХИБИН И ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЛОКОВ

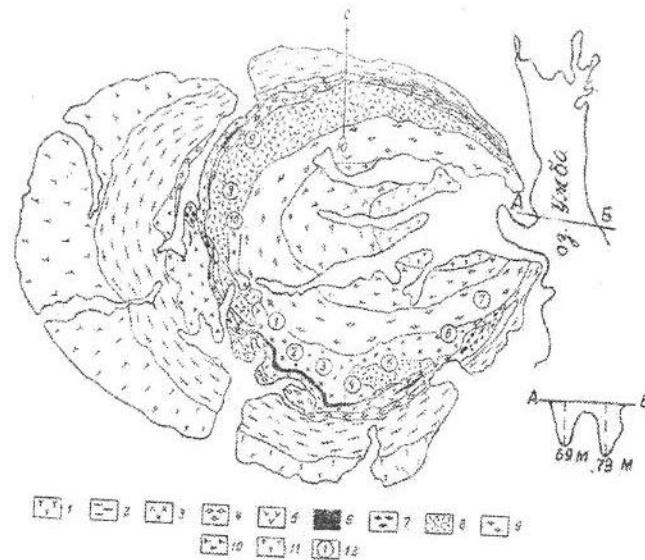
2.1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ХИБИНСКОГО МАССИВА И ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ЧЕРТЫ ЕГО ГЕОМОРФОЛОГИИ

Хибинский щелочная массив, к которому приурочены апатито-нефелиновые месторождения, расположен на Кольском полуострове, в области развития щелочного магматизма с многочисленными интрузиями щелочных-ультраосновных пород с карбонатитами. Территория района, сложенная преимущественно докембрийскими кристаллическими породами, испытывала влияние поздней тектоники. Стабилизация Кольской геосинклинальной зоны карелий в среднем протерозое привела к изменению формы тектогенеза и развитию главным образом глыбовой тектоники.

Вследствие этого, интрузивная деятельность приобрела платформенный характер и проявилась в связи с крупными разломами земной коры различного масштаба и глубины заложения [33,34], которые и явились путями проникновения магмы, образовавшей каледонские и герцинские интрузии центрального типа.

Каледонские интрузии располагаются за пределами Хибинского массива. Герцинские интрузии образовались в условиях возникновения крупных глубинных разломов, по которым и выдрялась магма щелочного состава, создавшая Хибинский и Ловозерский массивы.

Хибинский щелочной массив располагается в центральной части Кольского полуострова и имеет площадь 1327 км² (рис. 7). В рельфе выражается сильно расчлененной горной возвышенностью, поднимающейся над равниной на 600-1000 м. массив приурочен к северо-восточному глубинному разлому и контактирует с архейскими образованиями на севере и юго-востоке и с вулканогенно-осадочной толщей протерозоя на юге и западе [35].



Инtrузивные комплексы: 1-массивные хибиниты, 2-трахитоидные хибиниты, 3-рисчорриты, 4-трахитоидные ийолиты, 5-уриты, 6-рудные тела, 7-малинит-дуярриты, полевошпатовые ийолиты, 8-ливочорриты, 9-трахитоидные роговообманковые фойяны, 10-трахитоидные эгирин-роговообманковые фойяны, 11- массивные эгириновые синениты, 12- месторождения апатито-нефелиновых руд: 1-Кукисумчорр, 2-Юкспор, 3-Апатитовый Цирк, 4-Плато Расвумчорр, 5-Коашва, 6-Суолуйта, 7- Ньюрпахк, 8-Кузильпор, 9-Куинок-Лявойок, 10-Поячумчорр.

Рис. 7. Геологическое строение Хибинского массива
(В правой части рисунка показан рельеф дна оз. Умба)

Геофизическими исследованиями установлено, что контакт массива с вмещающими породами до глубины 3-7 км крутой – 70-80°, а затем выполняется до 40-50° [36].

Внутреннее строение массива определяется концентрически-зональным расположением интрузивных комплексов, образовавшихся в три периода, в каждый из которых входят породы, близкие по составу и генезису [37, 38].

Наряду с автометаморфизмом, сопровождавшим развитие каждого интрузивного комплекса, проявилась интенсивная постмагматическая деятельность, выраженная в обширной альбитизации, а также образовании эгирин-альбитовых жил. Разнообразные по составу породы дайкового комплекса (пикрит – порфиры,

мончикиты, щелочные габброиды, тингуаиты) имеют магматическое происхождение и связываются с глубинным магматизмом, проявившимся на Кольском полуострове.

Апатитовые месторождения генетически связаны с комплексом ийолит-уритов и разделяются на три рудных поля:

- юго-западное, включающее в себя месторождения Кукисумчорр, Юкспор, Апатитовый Цирк, Плато Расвумчорр;
- в юго-восточном рудном поле сосредоточены месторождения Коапва, Ньюрпахк, Эвеслогчорр, Олений ручей, Вуоннемийок;
- северо-западное поле объединяет месторождения Поачумчорр, Куинок-Лявойок, Куэльпор.

Юго-западное рудное поле приурочено к контакту ийолит-уритов с рисчорритами и имеет протяженность около 12 км. Азимут простирации меняется от 334° на Кукисумчоррском, до 270° на месторождении плато Расвумчорр. Падение залежи северо-восточное, угол падения 20-45°, мощность изменяется от 40 до 200 м. На глубину рудное тело прослеживается до абсолютной отметки – 200 м, что соответствует 1000-1200 м от поверхности.

Апатитовую залежь подстилают порфировидные уриты, с подчиненными в них участками ийолитов и пегматитов. Нижний контакт неровный, извилистый, характеризующийся постепенными переходами и устанавливается только по данным опробования. Отдельные тела этой залежи связаны между собой и обладают сходным строением. По содержанию апатита рудные тела разделяются на богатую и бедную зоны. Богатая зона представлена пятнистыми, пятнисто-полосчатыми и брекчиевидными текстурными разновидностями и приурочена к верхнему контакту рудного тела. Бедная зона сложена линзовидно-полосчатыми, сетчатыми, мелко и крупноблоковыми рудами и тяготеет к лежачему боку.

Геологическое строение юго-восточного и северо-западного рудных полей в общих чертах сходно с месторождениями юго-западной группы, но отличается более сложной морфологией и структурой рудных тел.

Апатито-нефелиновые руды резко отличаются от вмещающих пород не только по составу, но и по механическим свойствам. По своим свойствам породы и руды могут быть разделены на две группы. К первой из них относятся апатито-нефелиновые руды,

отличающиеся пониженной прочностью, заметной остаточной деформацией и обнаруживающие отчетливую зависимость показателей свойств от количественного содержания апатита. Кроме того, рудам присуща анизотропия механических свойств, обусловленная полосчатостью. Максимальная анизотропия свойств достигает 2, а в среднем составляет 1,15 – 1,30. Вторая группа пород представлена вмещающими ийолит-ургитами и рисчорритами, которые являются весьма крепкими и обладают упругим характером деформирования в широком диапазоне нагрузок.

Механические свойства однотипных пород и руд для всех апатитовых месторождений Хибин близки по своим показателям, поэтому в таблице 1 приведены общие средние значения [39].

Массивы пород, слагающих район месторождений, разбиты серией разломов и крупных трещин, к которым приурочены молодые жильные образования.

Повсеместно встречающиеся мончикиты залегают в виде даек, мощность которых колеблется от нескольких сантиметров до 10-15 м. Контакты их с вмещающими породами резкие, четкие, без каких-либо изменений в зальбандах. По ним наблюдаются смещения, амплитуда которых составляет до 15-20 м. Зоны милонитизации приурочены, как правило, к лужавитовым жилам и дайкам мончикитов и представляют собой породу, сложенную угловатыми обломками, которые сцеплены глиноподобной тонкозернистой массой (глинка трения). В отдельных случаях наблюдаются борозды скольжения. Смещения по зонам милонитизации имеют амплитуду до 8 м.

Широкое распространение имеют трещины, выполненные гидротермальными образованиями. В зависимости от положения трещин относительно рудного тела, выделяются четыре системы трещин: I система – продольные, II система – поперечные, III и IV системы – диагональные трещины. Некоторые систематизации включают пять систем трещиноватости [39]. Пространственная и количественная характеристика трещиноватости дана в таблице 2.

Таблица 1

Механические свойства пород и руд апатито-нерфелиновых месторождений Хибин

№ № пп	Порода (руды)	Содержание апатита %	Направление измерений относительно слоистости	Плотность т/м ³	Прочность при сжатии, Мпа	Прочность при растяжении, Мпа	Модуль упругости Е*10 ⁵ Мпа	Сцепление, Мпа	Угол внутреннего трения, град.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Ийолит-ургиты	10	без ориентировок	2,89	171	7,6	6,5	21,5	39
2	Малиниты	10	без ориентировок	2,9	219	9,6	8,5	24,3	38
3	Сеччатая руды	10-30	T	2,88	160	7,2	4,8	20,0	46
4	Сеччатая руды	10-30	II	2,88	142	6,2	7,0	19,3	46
5	Линзовидно-полосчатые руды	10-30	T	2,84	168	7,8	5,0	22,2	43
6	Линзовидно-полосчатые руды	10-30	II	2,84	150	5,1	7,3	14,5	48
7	Линзовидно-полосчатые руды	30-60	T	2,93	148	6,2	4,9	17,1	45
8	Линзовидно-полосчатые руды	30-60	II	2,93	144	4,7	6,2	14,3	49

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	Линзовидно-полосчатые руды >60%	T	2,96	137	5,2	3,9	15,5	53	
10	Линзовидно-полосчатые руды >60%	II	2,96	136	2,7	3,6	6,5	54	
11	Блоковые руды >60%	T	2,94	160	4,5	7,9	15,5	51	
12	Блоковые руды >60%	II	2,94	156	3,6	7,4	13,2	49	
13	Пятнисто-полосчатые руды >60	без орнаментировки	3,14	89	2,3	3,6	11,2	50	
14	Массивные руды 30-60	без орнаментировки	2,83	135	7,2	8,5	-	-	
15	Полосчатые руды >60	без орнаментировки	3,08	137	5,5	-	-	-	

30

Примечание: Т – измерения проводились перпендикулярно слоистости
II – измерения проводились параллельно слоистости

Таблица 2

Пространственная характеристика трещинноватости массива пород и руд на апатитово-нефелиновых месторождениях Хибин

Азимут простирания, град.	Азимут падения, град.	Угол падения, град.				Средняя частота трещин по системам, м					
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
КУКИСВУМЧОРР											
305	51	559	271	CB-I03	C3-I0B	B-3	C-Ю	60	75	70	61
КУЭЛЛЬПОР											
355	82	297	36	B-3	C-Ю	CB-I03	ЮВ-С3	67	59	52	60
ЮКСЮР											
311	56	3	274	CB-I03	C3-I0B	B-3	C-Ю	67	76	75	63
АГАЛИТОВЫЙ ЦИРК											
295	38	340	78	CB-I03	ЮВ-С3	CB-I03	ЮВ-С3	35	62	46	47
ШАЛО РАСВУМЧОРР											
272	1	326	40	B-3	CB-I03	ЮВ-С3	CB-I03	76	62	72	59

Таблица 3

Параметры напряженного состояния пород на месторождениях Хибин

Горизонт	Наименование пород (руд)	Глубина от поверхности, м	Величина максимальных горизонтальных напряжений, Мпа	Соотношение промежуточного и главного горизонтальных напряжений	Азимут вектора главного горизонтального напряжения, град.	Наклон вектора главного горизонтального напряжения к горизонту, град.
КУКИСВУМЧОРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ						
+ 322 м	Богатые руды	100	15-30	0,5-0,6	90+-30	20+-20
+ 322 м	Бедные руды	300	20-40	0,4-0,5	90+-30	20+-20
+ 252 м	Богатые руды	430	20-30	0,5-0,6	90+-30	20+-10
+ 252 м	Бедные руды	330	30-50	0,4-0,5	90+-30	20+-10
+ 172 м	Богатые руды	270	30-40	0,5-0,7	80+-30	20+-10
+ 166 м	Бедные руды	250	40-60	0,4-0,6	80+-30	20+-10
ЮКСПОРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ						
+ 600 м	Богатые руды	100	10-20	0,5-0,7	190+-30	0+-20
+ 600 м	Бедные руды	70	15-30	0,4-0,7	90+-30	0+-20
+ 410 м	Богатые руды	220	10-20	0,5-0,7	90+-30	0+-20
+ 322 м	Бедные руды	200	30-50	0,5-0,8	130+-30	35+-30
МЕСТОРОЖДЕНИЕ АПАТИТОВЫЙ ЦИРК						
+ 530 м	Богатые руды	350	20-30	0,3-0,5	120+-30	0+-25
+ 530 м	Бедные руды	350	30-50	0,4-0,5	120+-30	0+-25
+ 470 м	Лежачий бок	500	50-70	0,3-0,6	110+-30	0+-25
+ 420 м	Лежачий бок	550	60-80	0,4-0,6	90+-30	20+-25

Важной особенностью района месторождений является наличие высоких горизонтальных тектонических напряжений, значительно превышающих гравитационные. О высоком уровне палеонапряжений свидетельствует широко развитая пликативная и дисьюнктивная тектоника. Наличие современных полей напряжений в массиве подтверждается данными измерений методом разгрузки, проводимыми ГоИ КНЦ РАН на действующих рудниках. О величине измеренных напряжений можно судить по таблице 3. Как видно из таблицы, на различных апатито-нефелиновых рудниках главные горизонтальные напряжения значительно отличаются по величине. Направление их вектора в большинстве случаев горизонтальное и в плане, в общем случае, определяется как субширотное, однако отмечается высокая анизотропия даже в пределах одного шахтного поля.

Очевидно, что это обусловлено недостаточной изученностью тектонического строения района с учетом его блочности и структурной неоднородности. Влияние этих факторов на напряженно-деформированное состояние массива убедительно показано во многих работах [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49 и др.] и применительно к Хибинскому массиву требуют изучения. Более детальные сведения о взаимосвязи полей напряжений со структурными неоднородностями по данным автора приведены ниже.

2.2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ БЛОЧНОГО СТРОЕНИЯ ХИБИНСКОГО МАССИВА И ВЫЯВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ

Разрывные тектонические нарушения в значительной степени определяют характер протекания естественных процессов как в недрах Земли, так и в ее приповерхностной части. Особое развитие исследования разломов получили в учениях о рудных месторождениях и сейсмологии, где они приобрели большую практическую и теоретическую значимость.

Известно, что все сильные землетрясения мира связаны с крупными разломами, или узлами их пересечения, что свидетельствует о актуальности исследований разломной тектоники.

Во многих работах показано, что разломы представляют собой сложные геологические структуры, внутреннее строение которых также отличается большим разнообразием. Известно так-

же, что сейсмические события отмечаются не только в самой зоне разлома, но и в области, прилегающей к ней [50]. Поэтому является весьма важным не только выявить тектонически активные разломы, но и оценить пространственные размеры зон их влияния.

В основу настоящих исследований положена известная методика А.В. Орловой, изложенная работе [51], учтены рекомендации методических указаний по геодинамическому районированию недр, в разработке которых принимал участие автор [45], и использованы результаты геоморфологических исследований, проводимых автором в течение длительного времени [53, 54].

При проведении геоморфологических исследований блочного строения района, прежде всего, необходимо решить следующие задачи:

- выявить основные геоморфологические признаки тектонических форм рельефа, характерные для данного района;
- определить последовательность анализа топографических карт различных масштабов с тем, чтобы характерные формы рельефа могли бы быть отображены на картах соответствующего масштаба и, таким образом, ранжировать по иерархическому порядку блочные структуры;
- оценить динамическое взаимодействие блоков и выявить активные (живущие) разломы, проявляющие свою деятельность в настоящее время;
- определить время начала современных движений (возраст заложения разлома или время начала его последней активизации);
- исследовать степень активности разломов, что может быть определено по скорости движения блоков или по их сейсмической активности;
- исследовать динамическое взаимодействие блоков по выявленным активным разломам.

2.2.1. Геоморфологические признаки разломов

В геологической литературе новейшие разломы классифицируются по разному, в зависимости от того, как и для каких целей используются участки земной коры, расположенные вблизи разлома. Обычно считается, что разломы, неоднократно проявлявшие свою активность в недавнем геологическом прошлом, могут

возобновить свою деятельность и в будущем, и что подвижки по ним будут продолжаться. Например, в Калифорнии под активными понимаются разломы, проявлявшие свою деятельность во время голоцен, положение которых легко определимо и, которые вызвали смещение дневной поверхности. В Новой Зеландии к активным относятся разломы, неоднократно проявлявшие свою деятельность в последние 500 тыс. лет.

В своих исследованиях автор придерживался терминологии Ю.А. Мещерякова, который предложил считать новейшими тектонические структуры, следы которых непосредственно обнаруживаются в рельефе [7, 55].

О взаимосвязи рельефа с блоковыми структурами свидетельствуют работы многих исследователей [56, 57], а В.А. Апродов прямо указывает при этом, что неотектонические движения проникают до глубины 700-750 км и подчеркивает, что мозаично-блоковое строение неотектоносферы определяется перемещением отдельных участков земной коры, разделенных тектоническими нарушениями [58]. Рельеф поверхности создается главным образом за счет вертикальных движений по разломам различной глубины заложения и отражает блоковые структуры земной коры в зависимости от масштаба рельефообразующего разлома.

Общие закономерности движения Фенноскандии по данным различных исследователей характеризуются следующим образом:

- Оллиер К. и Спенсер Е. полагают, что максимальная скорость поднятия Фенноскандии за последние 7000 лет составляла 16 мм/год, а современная скорость поднятия достигает 10 мм/год [59];
- Николаев Н.И. считает, что за последние 10 000 лет на Кольском полуострове сохраняется куполообразный характер поднятия с максимумом в центре в несколько сотен метров [60];
- Кошечкин Б.И. и Стрелков С.А. тектонические поднятия на Кольском полуострове рассматривают как своеобразное всучивание единой глыбы с максимумом в центре 150-250 м за 10 000 лет [61];
- Никонов А.А. показывает, что на фоне общего поднятия Кольской глыбы происходят дифференцированные вертикальные движения отдельных блоков, а Хибинский и Ло-

возерский массивы в послеледниковое время испытывали поднятие со скоростью на 0,3-1,2 мм/год большей, чем скорость поднятия окружающей равнины [62].

Приведенные данные свидетельствуют об общем вздымании, которое испытывает земная кора на Кольском полуострове на протяжении всего послеледникового периода и по настоящее время. При этом скорость поднятия Хибинского массива больше, чем у вмещающей его толщи архея и протерозоя, что объясняется приуроченностью его к стыку северо-западного и северо-восточного глубинных разломов [2].

В горном районе Хибин роль блоковых структур наиболее ярко выражена и связь рельефа с разрывными нарушениями наблюдается непосредственно по ступенчатому характеру превышений участков с различными гипсометрическими уровнями, что характерно для нормальных сбросов. К наиболее ярким формам рельефа, связанным с вертикальными движениями, относятся тектонические уступы, представляющие собой крутые склоны, расположенные на взброшенном крыле разлома и протягивающиеся параллельно линии сместителя. Тектонические нарушения на таких участках представлены системами крутопадающих трещин-разломов с зеркалами скольжения, глинкой трения, зачастую трещины выполнены позднейшими гидротермальными образованиями.

К другим характерным формам рельефа относятся глубокие вытянутые ущелья с отвесными стенками. Эти ущелья разделяют платообразные вершины гор, имеющие различные высотные отметки. Стенки ущелий слабо эродированы. Вблизи ущелий отмечаются оперяющие трещины, на стенах которых имеются зеркала скольжения и борозды трения, а выполняющий их материал смят и разгнейсован.

И, наконец, в пределах массива развиты глубоко врезанные долины-троги (ледникового происхождения) с довольно пологими эродированными склонами. Дно их перекрыто моренными отложениями. Смежные вершины гор, разделяемые такими долинами, также имеют различные гипсометрические уровни.

О происхождении ущелий и долин существует несколько точек зрения. Так, Гладцин И.Н. рассматривает ущелья как результат морозного выветривания [63], Чирвинский П.Н. считает, что ущелья и долины образовались по разрушенным и шпреуштейнанизированным

зонам, которые легко поддаются выветриванию и размыву [64], а А.Д. Арманд и М.Д. Дорфман связывают происхождение отрицательных форм рельефа с зонами линейной коры выветривания [65]. Однако все исследователи указывают на приуроченность этих процессов к зонам разломов, представляющих участки наиболее ослабленных пород.

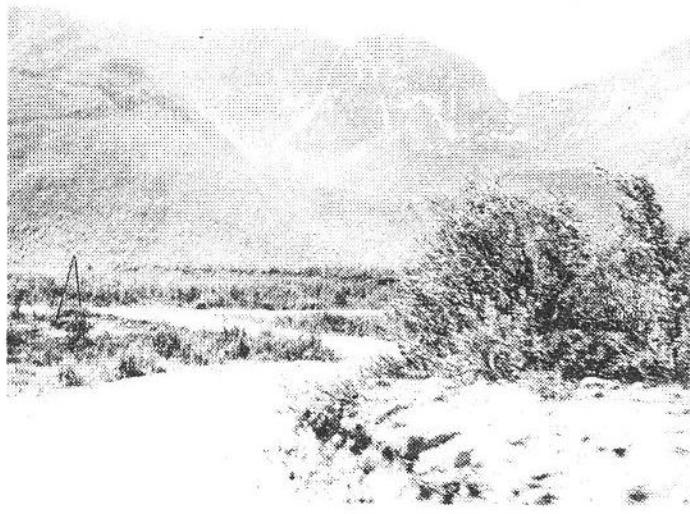
Кроме перечисленных геоморфологических признаков разрывных нарушений в рельефе, можно выделить следующие:

- своеобразный орографический рельеф Хибин, резко отличающийся от окружающей его местности;
- наличие системы разно ориентированных долин в массиве, совпадающих по положению с зонами разломов;
- наличие неправильно радиальной гидрографической сети, питающейся за счет родников и напорных трещинных вод, приуроченной к глубоко врезанным долинам и ущельям;
- наличие глубоких озер (Имандра, Умба), располагающихся дугообразно вдоль границ массива и совпадение их очертаний с границами массива;
- наличие на дне озер глубоких впадин (до 80 м) и поднятий, ориентированных параллельно разломам;
- совпадение заливов озер с направлением долин и разломов. Характерные формы рельефа Хибинского массива представлены на рисунке 8.

Геоморфологический анализ рельефа проводился от общего к частному в следующей последовательности:

- блоки 1 ранга устанавливались на основе дешифрирования топографических карт масштаба 1:2 500 000;
- блоки 2 ранга выявлялись на основе анализа снимков из космоса и топографических карт масштаба 1:500 000;
- выявление блоков 3 ранга производилось по картам масштаба 1:100000, в пределах блоков 2 ранга;
- блоки 4 ранга дешифрировались на картах масштаба 1:25 000.

При выявлении блочного строения полагалось, что рельеф поверхности формируется, главным образом, за счет вертикальных перемещений, которые происходят по разломам разной глубины заложения и отражает блоковые структуры различного ранга, в зависимости от размеров рельефообразующих разломов, а следовательно и от масштаба карт.



*Рис 8. Характерные формы рельефа Хибин
(вид из района долины Кукисумчорр)*

Естественно, что в природе не существует «чистых» сбросов или взбросов, сдвигов, раздвигов или надвигов. В любом случае, практически всегда, присутствуют и вертикальные перемещения, которые наиболее ярко фиксируются в рельефе. Поэтому, методическая задача заключается в том, чтобы используя зависимость формы рельефа от тектонических перемещений, определить местоположение рельефообразующих нарушений по геоморфологическим признакам с учетом гипсометрических уровней отдельных участков поверхности.

Разломы наносились на карту соответствующего масштаба путем последовательного соединения выявляемых границ блоков, сохраняя при этом на каждом участке соотношение разницы высот так, чтобы на всем протяжении один блок был опущен, а другой приподнят. При анализе карт 1:2500000 и 1:500000 по геоморфологическим признакам, выраженным в виде линейно вытянутых озер Умба и Имандр, а также развитой гидросети, представленной цепочками озер, соединяющихся между собой речками, надежно дешифрируются глубинные разломы, к узлу сопряжения которых приурочен Хибинский массив.

К западу от массива выделяется глубинный разлом северо-западного профиля (340°-360°), проходящий вблизи него по озеру Имандр. К югу от Хибин прослеживается глубинный разлом субширотного профиля (90°-100°), по которому Хибинский блок приподнят. С севера и востока Хибины также ограничиваются разломами, легко дешифрируемыми по гидросети. Характерный тектонический рельеф дна озера Умба можно видеть на рисунке 7. Тектонические границы Хибинского массива с вмещающими породами архея и протерозоя отчетливо контролируются в рельефе широкой сетью вытянутых озер, соединяющихся между собой речками и ручьями. В пределах самого массива на картах масштаба 1:500 000 по 4 тектоническим формам рельефа выделено 16 блоков второго ранга, разделенных между собой разломами (рис. 9). Характер движения блоков глыбовый, грабено-горстовой, что свидетельствует о преимущественно вертикальных дифференцированных движениях.

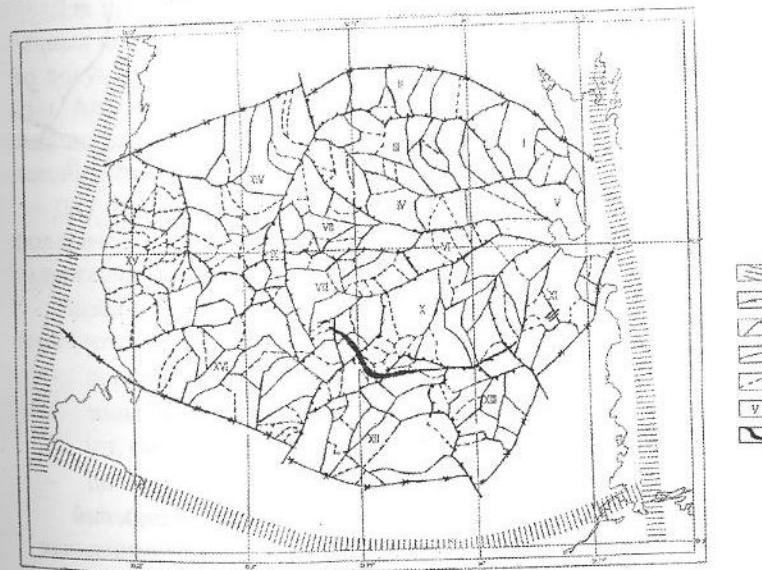


Рис 9. Схема блочного строения Хибинского массива.

1-региональные разломы, 2-разломы, обрамляющие массив, 3-разломы второго ранга, 4-разломы третьего ранга, 5-разломы четвертого ранга, 6- порядковый номер геодинамических блоков, 7-apatито-нефелиновые руды.

Блоки 3 ранга выявлялись следующим образом: границы блоков и разломы второго ранга наносились на карту масштаба 1:100 000 и дальнейшие исследования проводились в пределах границ каждого блока в отдельности. При этом границы ранее выявленных блоков уточнялись в соответствии с геоморфологическими признаками.

При анализе тектонических форм рельефа выделялись перемещенные блоки, характеризующиеся одним знаком и приуроченные к одному тектоническому нарушению. В рельефе это проявляется в виде устойчивого превышения одного блока, прилегающего к разлому, над другим, смежным с ним.

Для дешифрирования блоков четвертого ранга использовались топографические карты масштаба 1:25 000. Геоморфологическими признаками разломов этого ранга являются уступы на склонах гор, узкие ущелья и расщелины.

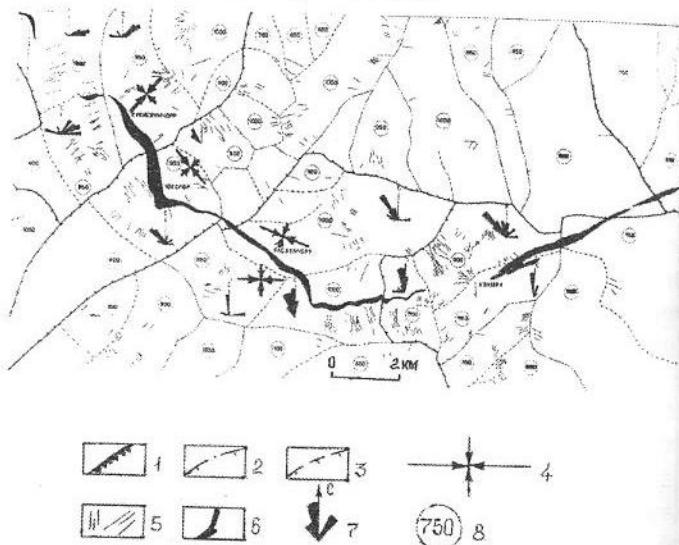


Рис 10. Блочное строение района месторождений и сопоставление направления действия горизонтальных напряжений с ориентировкой трещин.

1 – разломы второго ранга; 2 – разломы третьего ранга; 3 – разломы четвертого ранга; 4 – направление действия горизонтальных напряжений, 5 – трещины, дешифрированные на картах масштаба 1 : 25000; 6 – рудные тела; 7 – розы-диаграммы трещин; 8 – гипсометрические уровни блоков.

Сравнение полученных данных показывает, что на картах более крупного масштаба повышается детальность иерархически блочного строения. Это происходит потому, что многие геоморфологические признаки на мелкомасштабных картах не дешифрируются, так как сами нарушения в рельефе проявляются в виде узких ущелий и расщелин незначительной протяженности и в масштабе карт не укладываются. Так, например, на картах масштаба 1:25 000 кроме разрывных рушений отчетливо выявляются и крупные тектонические трещины, которые можно видеть на рисунке 10. Из рисунка видно, что в различных блоках розы-диаграммы направленности трещин отличаются в значительной степени, а значит их формирование происходило в отличающихся условиях напряженно-деформированного состояния.

2.2.2. Подтверждение результатов геоморфологического анализа тектонических форм рельефа

Для проверки и уточнения местоположения разломов, выявленных по геоморфологическим признакам, проводились работы по документации обнажений, горных выработок буровых скважин. Анализировалась и использовалась имеющаяся геологическая документация на участках, примыкающих к разломам, выделенным по топографическим картам.

Для подтверждения существования разломов, кроме геоморфологических, использовались тектонические, магматогенные и гидрогеологические признаки.

Тектонические признаки неотектонических процессов характеризуются следующим:

- породы по разрывным нарушениям смещены;
- зоны дробления и интенсивной трещиноватости пересекают, смещают и брекчируют все комплексы пород;
- по нарушениям прослеживаются глинка трения, зеркала скольжения и зоны милонитизации. Даже позднейшие жильные и дайковые комплексы были подвержены воздействию современной тектоники.

Магматогенные признаки точнее было бы назвать постмагматогенными, ибо они проявились в результате деятельности постмагматических процессов в виде позднейшей минерализации зон разломов и гидротермальной переработки окружающих пород.

К ним относятся:

- наличие цеолитовых и кальцитовых жил, выполняющих трещины;
- наличие зон шпреуштейнизации пород, развившихся по тектоническим нарушениям.

Гидрогеологические признаки, к которым относятся:

- родники, дающие начало горным речкам и ручьям, которые питаются за счет подземных трещинных вод;
- фонтанирующие воды из геологоразведочных скважин;
- термальные воды, встречаемые в геологоразведочных скважинах, обычно использовались как косвенные.

Гидрогеологические признаки изучены недостаточно, но поскольку породы, слагающие Хибинский массив, имеют весьма низкую пористость (до 3%), то наличие подземных вод свидетельствует о том, что они концентрируются и мигрируют по зонам интенсивной трещинноватости, которые обусловлены деятельностью позднейшей тектоники. Например, фонтанирующая скважина № 546, расположенная на северной оконечности оз. Большой Вудъяvr, пробурена в зоне разлома второго ранга. В скважине № 557, на глубине 952-958 м вскрыты высоконапорные термальные трещинные воды с температурой +18°C, в то время, как обычно температура подземных вод на таких глубинах в Хибинах составляет +2° – +6° С. Эта скважина также пересекает разлом 2 ранга.

Анализ материалов полевых наблюдений показал, что отрицательным формам рельефа соответствуют зоны шпреуштейнизации, зоны дробления или интенсивной трещинноватости, т.е. участки наиболее ослабленных пород, которые легко поддаются различным эрозионным процессам. К таким формам рельефа относятся долины, ущелья, расщелины. Сходимость результатов анализа тектонических форм рельефа в Хибинах с данными полевых наблюдений, рассмотрим на примере Саамского разлома, разделяющего Вудъяvrский, Рассумчоррский, Кукисумчоррский и Юкспорский блоки третьего ранга.

На участке, от кольцевых тектонических структур, обрамляющих массив с юга, и до северной оконечности озера Большой Вудъяvr, разлом проходит по долине реки Малая Белая, разделяя Вудъяvrский и Рассумчоррский блоки. На всем этом протяжении разлом перекрыт моренными отложениями, однако, по

характеру рельефа долины и окружающих гор местоположение разлома определяется по северо-западному берегу оз. Большой Вудъяvr, имеющего максимальные глубины (до 80 м) во впадине, примыкающей к горе Вудъяvрчорр, отвесные склоны которой обрываются в озеро. На картах масштаба 1:25000 и 1:5000 прослеживаются оперяющие разломы, в рельефе выраженные в виде уступов на горе Вудъяvрчорр (рис.11).

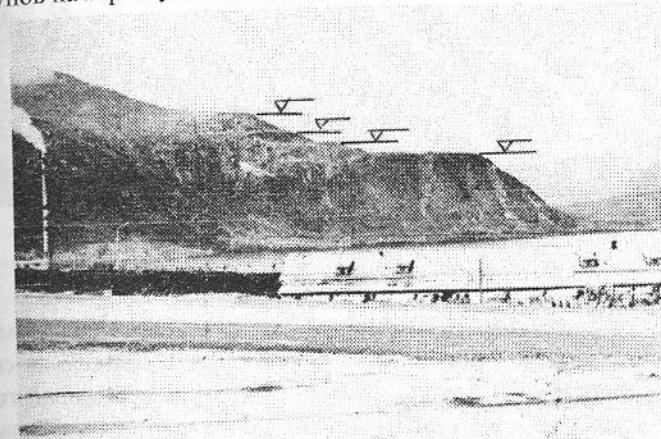


Рис. 11. Уступы на горе Вудъяvрчорр

Угол падения разлома близкий к вертикальному. Далее на север, описываемый разлом проходит по долине реки Саамская (рис. 12), разделяя Кукисумчоррский и Юкспорский блоки. Азимут его простирания 50°-60°. В рельефе он проявляется на спрямленных участках долины. В долине реки разлом перекрыт моренными отложениями и обнажается лишь на Лопарском перевале и его склонах, проявляясь в виде зоны интенсивной трещинноватости, зон дробления и милонитизации. Мощность зоны разлома около 30 м. Этот разлом хорошо прослеживается на всех уступах Саамского карьера (до отметки +64 м) и в подземных горных выработках в виде зоны шпреуштейнизации мощностью 25-30 м, развившейся по зоне дробления (Рис. 13). В лежачем боку зоны шпреуштейнизации, в подземных горных выработках прослежена дайка мончикитов мощностью 1,5-2 м, которая также подвергнута дроблению, измята и перетерта, по трещинам хорошо выражены зеркала скольжения.

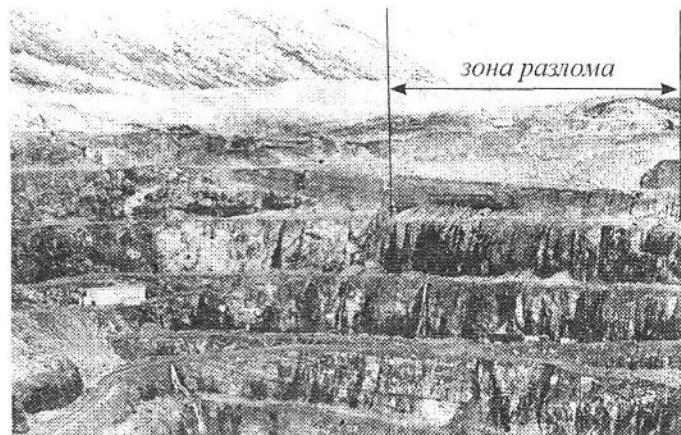


Рис. 12. Саамский разлом в борту карьера

За Лопарским перевалом разлом перекрыт моренными отложениями, однако отчетливо проявляется в рельефе на спрятанных участках глубоко врезанной долины небольшой горной речки, являющейся притоком реки Тулийок. На участках реки, у подножья Лопарского перевала, речка протекает по узкому ущелью с отвесными стенками, образовавшемуся в результате размыва шпреуштейнизированных пород, выполняющих зону разлома.

На всем оставшемся протяжении, проходя по долине реки Тулийок, разлом перекрыт моренными отложениями. Предположение о существовании этого разлома высказано в работе [66], а в работе [67] он детально описан как один из шести радиальных разломов Хибин.

Подобным образом на местности прослежены все разломы 2-4 рангов, выявленные на картах в пределах Кукисвумчоррского, Юкспорского и Расвумчоррского месторождений, однако зафиксировать их в подземных горных выработках не всегда представляется возможным в силу того, что горные выработки на таких участках просто отсутствуют. блок с запада, в подземных выработках картируется в виде зоны дробления и шпреуштейнизации, мощностью около 20 м.

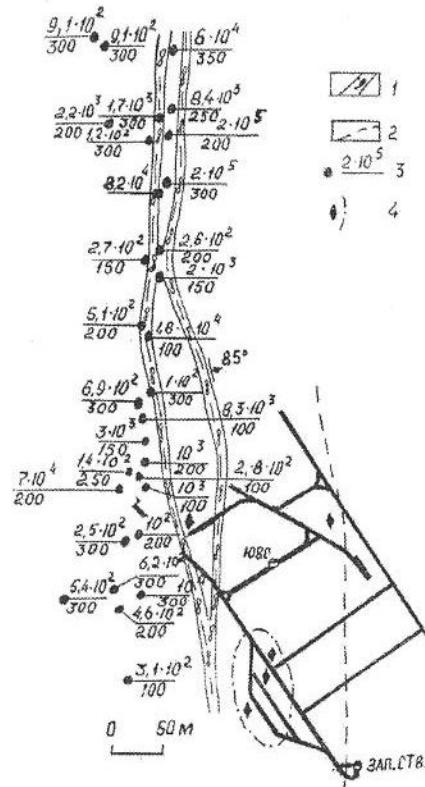


Рис 13. Саамский разлом по документации горных выработок и Саамского карьера (план)

1 – зона разлома; 2 – граница зоны влияния разлома (удароопасный участок); 3 – местоположение толчков (в числителе – энергия в Джоулях, в знаменателе – глубина в абсолютных отметках, м); 4 – горные удары и граница их проявления.

В отдельных случаях при анализе тектонических форм рельефа удается выявить разломы, не установленные ранее. Так, разлом, разделяющий Юкспорский и Расвумчоррский блоки, был выявлен лишь по геоморфологическим признакам. Существование его было подтверждено при проведении шахтных стволов ЦВС-1 и ЦВПС-1, которые вскрыли крутопадающую зону дробления с напорными трещинными водами. После уточнения и нанесения

выявленных тектонических нарушений на топографические карты и планы поверхности рудников, проводились исследования по выявлению блоковых структур внутри блоков 4 ранга, т.е. блоков 5 ранга. Для этих целей автором использовались данные геологической документации горных выработок и скважин, имеющиеся в геологических службах рудников, а также материалы, полученные лично автором за период длительной работы рудничным геологом. Кроме того, проводились специальные работы по съемке трещиноватости в горных выработках и обработка полученных данных.

Материалы геологической документации горных выработок свидетельствуют о наличии серии структурных элементов, контролирующих деятельность постмагматической разрывной тектоники. По характеру проявления выделяются три основных типа:

- дайки мончикитов, приуроченные к крутопадающим трещинам отрыва сбросового типа. Простижение даек северо-западное 300° - 306° , падение на юго-запад, под углом 75° - 85° . Мощность даек обычно составляет 0,2-1 м, но иногда достигает 10-15 м;
- зоны шпреуштейнизации пород, представляющие собой гидротермальные образования, развившиеся по тектоническим нарушениям, секущие все более ранние образования, включая и дайки мончикитов. Иногда зоны шпреуштейнизации развиваются в висячем боку даек мончикитов, нарушая их. Обычно они имеют восток-северо-восточное (60°-64°) и запад-северо-западное (300° - 303°) направления. Углы падения крутые (75° - 90°). Разломы северо-западного простирания (диагональные по отношению к рудному телу) обнаруживают признаки взбросо-сдвиговых и сдвиговых смещений. Амплитуды горизонтальных перемещений, зафиксированных в горных выработках, достигают 5 м, вертикальных – 2 м. Разломы северо-восточного направления (поперечные по отношению к рудному телу) обычно почти вертикальные, нередко разветвлены, сопровождаются значительными зонами дробления. В отличие от диагональных нарушений признаки рассланцеватости и милонитизации в них отсутствуют, что свидетельствует о том, что их образование происходило в условиях растяжения. По ним отмечаются сбросовые смещения с амплитудой до 20 м;

– разрывная трещинная тектоника, характеризующаяся широким развитием трещин сравнительно небольшой протяженности (от нескольких метров до первых десятков метров). Выделяются четыре системы трещин: продольная по отношению к рудному телу, поперечная и две системы диагональных трещин. Характеристика систем трещиноватости представлена в таблице 2.

Возрастные взаимоотношения разрывных нарушений устанавливаются довольно четко и однозначно. Наиболее ранними из постмагматических нарушений являются трещины, выполненные дайками мончикитов. За ними следуют нарушения, с развитыми по ним зонами шпреуштейнизации. Следующий этап сдвижений запечатлен в разрывных нарушениях без какой-либо минерализации. При этом подвижки происходили как по сформировавшимся ранее нарушениям, запечатлеваясь в зонах дробления, милонитизации, зеркалах скольжения, так и с образованием новых разрывов.

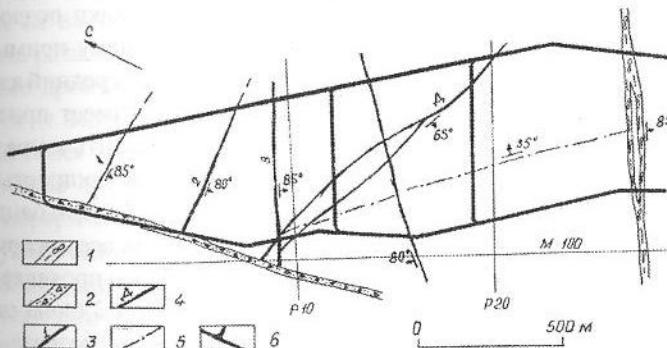


Рис. 14. Разрывные нарушения на гор. + 252 м Кировского рудника.
1 – Саамский разлом; 2 – разлом Ворткеуай; 3 - поперечные разломы №№1,2,3; 4 – диагональный разлом; 5 – разлом, выполненный разгнейсированной жилой эгирина; 6 – откаточные выработки.

Для примера на рис. 14 показан один из горизонтов Кировского рудника, расположенный в пределах блока 4 ранга. В районе 4-5 разрезов блоки разграничены крутопадающей зоной шпреуштейнизации (поперечный разлом 2), простижение которой 85° - 90° . Мощность ее на гор. +252 м составляет 1,5-2 м. В восточной части нарушения процесс шпреуштейнизации затухает и разлом

проявляется только в виде системы односторонних трещин, интенсивность проявления которых снижается в восточном направлении. Разлом прослеживается и на верхних горизонтах рудника, но с глубиной его мощность уменьшается.

В районе геологического разреза 9 проходит почти вертикальный разлом мощностью около 10 м (поперечный разлом 3). Направление его северо-восточное 60° - 64° . В рельфе нарушение проявлено в виде цирка, переходящего на вершине горы в седловину. Отмечается зона дробления, свидетельствующая о вертикальных движениях по разлому.

Диагональный разлом (Д), имеющий средний азимут 120° и угол падения около 65° на юго-запад и поперечный разлом 3, круто падающий на северо-запад (азимут простирации 45° , угол падения 80°), разделяют среднюю и южную части горизонта на блоки 5 ранга. В южной части шахтного поля проходит Саамский разлом, мощностью до 25 м. Азимут его простирации 60° - 65° . Наличие зоны дробления и геологические признаки позволяют отнести его к сбросу с амплитудой 25-30 м. К нему примыкает разлом Ворткеуай северо-западного направления, средний азимут 350° , падающий практически на запад. Разлом имеет признаки всбросо-надвига. Особое внимание следует обратить на разлом, выполненный жилой разгнейсованного эгирина, мощностью от 10 до 15 см, со слабо развитой шпреуштейнизацией зальбанд. Он прослеживается по простираннию рудного тела на всех вскрытых горизонтах рудника, вблизи его нижнего контакта и проявляет все признаки живущего разлома. Поперечный разлом 3 (зона шпреуштейнизации), пересекающий рудное тело около 9 разреза, смещает разгнейсованную жилу эгирина по типу сброса. Подробно о этом нарушении и его активности изложено ниже.

2.2.3. Определение возраста движений

При строительстве горно-рудных предприятий и эксплуатации месторождений, возведении ответственных и потенциально опасных промышленных объектов и сооружений необходимо проводить для них оценку сейсмической опасности. В этом случае, единственно надежными критериями являются степень активности разломов, возраст проявления их позднейшей активности, глубина заложения и протяженность.

Естественно, что если наличие разломов установлено, то самым важным является вопрос определения времени их заложения и проявления позднейшей активизации.

Определение возраста разломной тектоники может быть произведено несколькими способами, такими как датирование по возрасту перекрывающих пород, датирование с использованием возраста почв и профилей выветривания, датирование по соотношению с речной сетью, использование относительного возраста поверхностей выравнивания.

В различных регионах земного шара, в зависимости от условий формирования и истории развития возможно использование того или иного метода, или нескольких из них. Приведем основные особенности каждого из перечисленных методов и попытаемся обосновать возможность его применения для определения возраста разломов в Хибинах.

Датирование по возрасту перекрывающих пород является одним из наиболее часто используемых методов определения возраста разломов. Метод основан на том, что если разлом нарушает более древние породы, а более молодые (перекрывающие) остаются не нарушенными, то возраст разлома, по крайней мере, является более древним, чем перекрывающие породы. Этот метод, как и всякие другие, является относительным, а в случае длительного перерыва в осадконакоплении, или формировании каких-либо других геологических образований, дает значительный разброс в крайних оценках определения возраста. Для определения возраста неотектонических движений в Хибинском массиве этот метод может быть использован только при анализе моренных отложений и, в этом случае, можно судить о наличии современных движений.

Датирование с использованием возраста почв и профилей выветривания может быть использовано в тех регионах, где развита кора выветривания, сформировавшаяся в различные периоды, которую по каким-либо признакам можно классифицировать по возрасту. В этом случае также используется принцип «последействия». Для условий Хибин может быть приемлема его разновидность, в основу которой положена неравномерность распределения моренных отложений на одних и тех же высотных отметках дна долин и ущелий.

Датирование по соотношению речной сети также довольно широко используется в геоморфологических исследованиях.

Анализ гидрографической сети позволяет выявлять тектонические структуры в силу неодинаковой устойчивости толщ, подвергающихся избирательной эрозии. Тектонические процессы обуславливают широкий диапазон форм рельефа, в том числе определяют и рисунок гидросети, по которому можно осуществлять реконструкцию тектонических движений.

Использование относительного возраста поверхностей выравнивания основано на том, что зная их возраст и пространственное положение различных участков, смещенных по тектоническому нарушению, представляется возможным судить о возрасте разлома. В этом случае особое значение приобретает точность оценки возраста поверхностей выравнивания. Для условий Хибинского массива этот метод является наиболее подходящим.

Из всех видов эрозионных процессов, происходивших на территории Кольского полуострова, наиболее сильно проявилась ледниковая эрозия, повсеместные следы которой ярко выражены в формах рельефа. В его равнинной части древние кристаллические породы перекрыты моренными отложениями, а горные районы имеют ярко выраженные ледниковые формы рельефа, для которых характерны слаженные платообразные вершины гор и долины-троги.

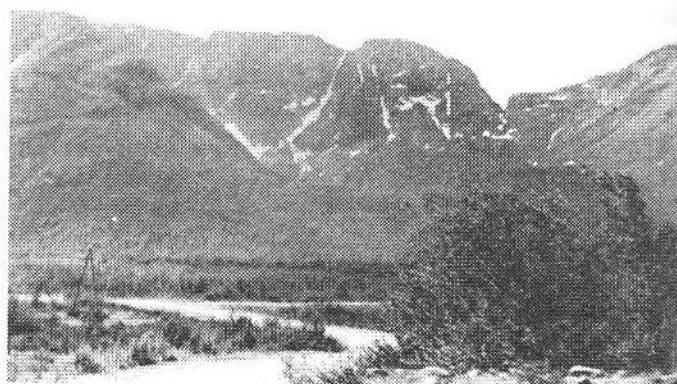


Рис. 15. Смещение ледниковой поверхности выравнивания. Уступы в рельефе определяют местоположение разломов пятого ранга (вид из долины Кукисвумчорр)

По мнению большинства исследователей длительность по-следникового периода составляет около 10 000 лет, что, по всей вероятности, и является возрастом ледниковых поверхностей выравнивания на территории региона. Исходя из этого, можно полагать, что если за последниковый период времени происходили дифференцированные движения земной поверхности по разломам, то это должно найти отражение в смещениях ледниковой поверхности выравнивания (Рис. 15).

При определении возраста разломов, выявленных в Хибинском горном массиве методом геоморфологического анализа, приняты следующие положения:

- наиболее сильному эрозионному воздействию Хибинский массив подвергался в ледниковый период (около 10 000 лет назад), поскольку в его пределах широко развиты ледниковые формы рельефа, образовавшиеся в результате ледниковой эрозии;
- ледниковая поверхность выравнивания принята за точку отсчета начала современных (последниковых) движений, то есть, если за этот период времени происходили дифференцированные движения смежных блоков по разломам, то это отразилось в смещениях ледниковой поверхности выравнивания;
- сама же ледниковая эрозия наиболее сильно проявилась на участках, сложенных менее прочными породами или ослабленными интенсивной трещиноватостью и зонами дробления (в зонах разломов).

Поскольку разломы представляют собой зоны наименее прочных пород по отношению к окружающим, то зона разлома и участки, прилегающие к ней, наиболее сильно разрушаются в процессе выветривания и в рельефе соответствуют отрицательным формам. По интенсивности развития эрозионных процессов в зонах разломов и их характеру можно судить о длительности процесса эрозии, а анализ вида эрозии позволяет оценить и время заложения разломов.

Полагая, что наиболее сильной денудации в пределах Хибинского массива соответствовала деятельность ледников, последствием которой являются ледниковые долины-троги с пологими, слаженными стенками, то широкие, глубоко врезанные долины,

контролируются разломами доледникового времени заложения, поскольку зоны разломов легче поддаются разрушению.

Узкие ущелья и расщелины, с отвесными стенками, а также тектонические уступы по времени образования являются наиболее поздними – послеледниковыми, т.к. процессам разрушения они подвержены в значительно меньшей степени и ледниковая эрозия в них не проявилась.

Кроме исследования ледниковых поверхностей выравнивания и ледниковой эрозии, проведен анализ распространения моренных отложений в пределах массива. Суть этих исследований заключается в том, что моренные отложения, являющиеся продуктом деятельности ледников, в пределах Хибинского массива развиты не повсеместно, и на отдельных участках отсутствуют, что может служить диагностическим признаком того, что если формы рельефа сформировались до ледникового периода, то на них должны быть моренные отложения. Если же моренные отложения отсутствуют в долинах или ущельях, то их возраст явно послеледниковый.

Анализ распространения моренных отложений показал, что моренные отложения развиты в долинах, подвергшихся ледниковой эрозии, в то время, как глубоко врезанные ущелья и расщелины, с отвесными стенками, на дне своем имеют только продукты разрушения стенок (осыпи), несмотря на то, что уровень и долин и ущелий имеет одинаковые высотные отметки.

В противовес тому, что моренные отложения в ущельях могли быть смыты водными потоками свидетельствует то, что горные речки и ручьи практически в одинаковой степени развиты как в долинах, так и в ущельях. Разница заключается в том что в долинах реки более полноводны и обладают большей энергией, а значит в большей степени способствуют водной эрозии, в то время, как в ущельях они имеют вид ручьев.

Таким образом, возраст разломов различного ранга и их возрастное взаимоотношение по геоморфологическим признакам устанавливается в следующем порядке:

- разломы 2 ранга были заложены в доледниковое время, о чем свидетельствуют все признаки: в рельефе они выражены в виде широких, глубоко врезанных долин с пологими склонами, эродированными ледником, на дне долин повсеместно развиты моренные отложения (продукты лед-

никовой деятельности). В послеледниковый период они испытали омоложение и проявляют свою деятельность в настоящее время;

разломы 3 и 4 рангов, выраженные в рельефе в виде узких ущелий и расщелин, а также тектонических уступов, заложены в послеледниковый период. По крайней мере, по ним отмечаются лишь послеледниковые дифференцированные восходящие движения, запечатлевшиеся в формах рельефа. Об этом свидетельствуют следующие факты: отвесные стени ущелий, расщелин и уступов не подвержены ледниковой эрозии, на их дне моренные отложения отсутствуют, а отмечаются лишь отложения, представляющие собой продукты разрушения стенок. Это говорит о том, что эти формы рельефа сформировались после последнего оледенения.

Проблема определения возраста ущелий, а значит и оценки возраста современных движений интересовала многих исследователей. Так, в работе [68] на южном склоне Хибин описана система ущелий, образующих единую тектоническую зону, отнесенную к постингрузивному возрасту. Ее изучением занимался Б.М. Куплетский, который выделил два морфологических типа ущелий в пределах этой зоны – переработанные ледниками и непереработанные, то есть доледниковые и послеледниковые.

В работе [69] на основании морфологии ущелий южного склона Хибин и степени сохранности ледниковых отложений сделан вывод об их послеледниковом возрасте. Образование ущелий здесь автор связывает с молодыми тектоническими движениями по ослабленным зонам в процессе изостатического поднятия после таяния ледников.

На наличие послеледниковых движений указано так же в работах [70, 71, 72, 73]. В работах [74, 75] на южном склоне Хибин показаны сдвиговые деформации послеледникового возраста, при этом отмечены не только вертикальные движения, но и горизонтальные, преимущественно правосторонние нарушения, максимальная амплитуда которых достигает 600 м.

2.2.4. Определение относительной скорости движений блоков различного ранга

Движения земной коры являются длительным процессом, направленаность которого не меняется в течение продолжительного времени (десятки и сотни тысяч лет). Поэтому относительная скорость движений блоков может быть оценена по амплитудам смещения за какой-то отрезок времени.

В данном случае ледниковые формы рельефа можно принять за своеобразную точку отсчета начала современных движений, продолжительность которых соответствует длительности последледникового периода, что по средним оценкам составляет около 10 000 лет со времени последнего оледенения.

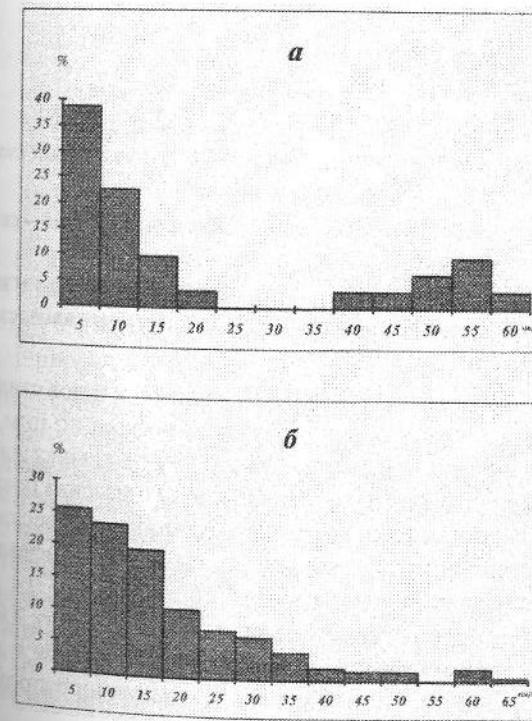
Амплитуда смещения по разлому в исследованиях определялась как разница гипсометрических уровней блоков, разделяемых разломом, по которому происходили дифференцированные движения. За отметку уровня блока принималась максимальная абсолютная отметка ледниковой поверхности выравнивания для каждого конкретного геодинамического блока.

При оценке средней относительной скорости вертикальных движений блоков 2 ранга за послеледниковый период в подсчет принял 31 разлом, по которым на карте масштаба 1:500 000 представлялось возможным определить разницу в высотных отметках блоков. Скорость их движения определялась простым делением амплитуды смещения на время, за которое эти смещения происходили. На основе полученных данных построена гистограмма распределения средней скорости движения блоков, где по оси абсцисс отложена средняя скорость с интервалами 0-5; 5,1-10 и т.д. мм/год. По оси ординат – количество разломов, по которым отмечены такие скорости, в процентах от общего числа. Гистограмма распределения относительной скорости движения блоков 2 ранга показана на рис. 16а. Из рисунка видно, что в большинстве случаев (12), т.е. (38,7%) скорости поднятия составляют 0-5 мм/год, в семи случаях (более 22%) -5,1-10 мм/год, в трех случаях – 50,1-55 мм/год (около 10%). Максимальная скорость движений составляет 56,8 мм/год и отмечена только в одном случае.

Таким же образом оценивалась средняя скорость движения блоков 3 ранга, выявленных на картах масштаба 1:100 000. В подсчет принято 214 разломов, по которым оценены амплитуды

смещений. На рисунке 16б показана гистограмма распределения скоростей дифференцированного поднятия блоков 3 ранга. Определение амплитуды смещения блоков 4 ранга осуществлялось на топографических картах масштаба 1:25 000. Абсолютные отметки ледниковой поверхности выравнивания блоков определялись с точностью до одного метра. При оценке скорости движения блоков в подсчет принял 531 разлом. Гистограмма распределения представлена на рис. 16в.

Для сравнения на рис. 16г показана сводная гистограмма распределения скорости движения блоков различного ранга, на которой видно, что относительная скорость движения блоков 2 ранга более дифференцирована, в большинстве случаев (более 38%) не превышает 5 мм/год, в интервале скоростей от 20 до 35 мм/год движений не отмечалось, но в то же время более 15% блоков испытывали движения со скоростью от 45 до 55 мм/год. Распределение блоков 3 и 4 рангов по скорости движения более равномерно.



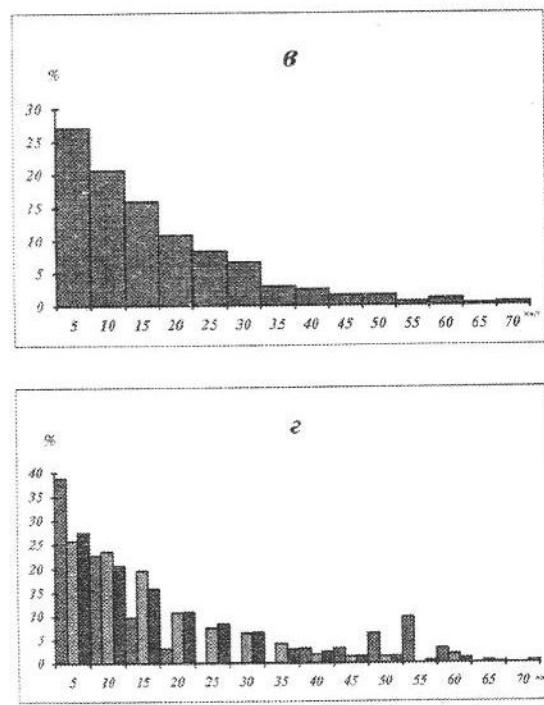


Рис. 16. Гистограммая распределения относительной скорости движения блоков.

а – второго ранга; б – третьего ранга; в – четвертого ранга; г – сводная.

2.2.4.1. Сопоставление результатов геоморфологических исследований с инструментальными измерениями скорости поднятия блоков

Геологическим институтом КНЦ в конце 60-х годов стали закладываться геодезические профили для организации по ним высокоточных нивелировок с целью выявления вертикальных движений. Расположение профилей в районе Хибинского массива показано на рис. 17. Для сопоставления результатов геоморфологических исследований с данными инструментальных наблюдений использованы материалы, опубликованные в работах [16, 27, 28, 76, 77]

Линии нивелирования пересекают южный контакт Хибинского массива с метаморфизованной толщей протерозоя в двух местах. Одна из линий Титан-Кировск-Кукисумчорр проходит по

железной дороге Апатиты-Кировск. В районе Кукисумчорра линия разветвляется и образует замкнутый полигон, включающий в себя транспортный тоннель в горе Юкспор. Другой нивелирный профиль проложен вдоль шоссейной дороги, ведущей на плато Расумчорр (рудник Центральный).

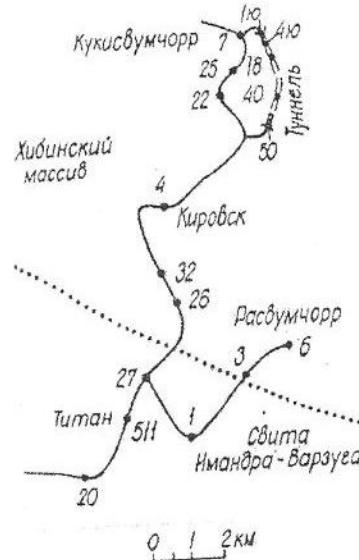


Рис. 17. Расположение профилей высокоточного нивелирования в Хибинах. Южный контакт массива со стойкой Имандрой-Варзуга показан точками, сплошная линия – геодезический профиль, цифрами обозначены номера пикетов

Нивелирование по этим профилям производилось с 1967 года, В результате многолетних наблюдений установлено, что за весь период времени Хибинский массив поднимается со скоростью на 1-2 мм/год большей, чем окружающая его равнина. В пределах самого массива скорость поднятия отдельных участков профиля непостоянна как по месту, так и по времени.

Юкспорский транспортный тоннель проведен через гору Юкспор, в пределах которой расположено одноименное месторождение, по подстилающим породам, представленным преимущественно ийолит-уртитами, с включениями пегматитовых тел.

По данным геологической службы рудника, где автор работал более 10 лет, на протяжении всей трассы тоннеля широко развита разрывная тектоника, которая по принятой в данной работе классификации, относится к разломам 5 ранга. Разломы выполнены крутопадающими (около 90°) дайками мончикитов, северо-восточного (63° - 65°) простирания. Мощность даек составляет 6-10 м. Дайки мончикитов задокументированы на всех горизонтах рудника. Сами дайки рассланцованны, перемяты, отмечаются зеркала скольжения. По их зальбандам отмечается шпреуштейнизация. Имеются взбросо-сдвиговые смещения, амплитуда которых составляет 12-15 м.

Другой тип разломов представлен вертикальными зонами шпреуштейнизации, азимут простирания которых изменяется от 65° до 80° . Их мощность различна и колеблется в пределах от 1-2 до 15 м. Также отмечаются признаки взбросо-сдвиговых смещений, однако достоверно определить их амплитуду довольно сложно, ввиду интенсивной переработки вмещающих пород. Ориентировочно амплитуды смещений до 10 м. Кроме того, широко развита трещинная тектоника, проявившаяся как в виде отдельных трещин различного направления, так и в виде зон интенсивной трещиноватости, со слабо развитой шпреуштейнизацией.

Схема геологической документации Юкспорского тоннеля представлена на рис. 18.

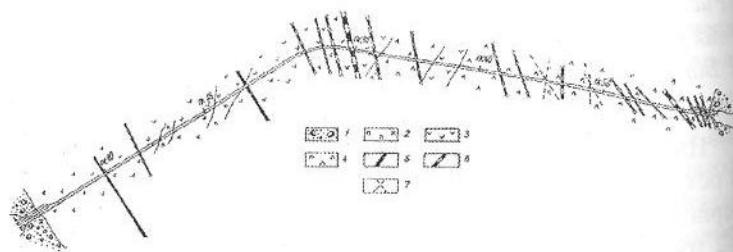


Рис. 18. Геологическое строение массива по трассе Юкспорского тоннеля.

1 – моренные отложения; 2 – пегматиты; 3 – уртиты; 4 – ийолиты; 5 – дайки мончикитов; 6 – зоны шпреуштейнизации; 7 – зоны трещиноватости.

По линии Титан-Кукусумчорр нивелировки выполнялись в 1967, 1969, 1970, 1975, 1978 и 1980 годах, по профилю Титан-Расвумчорр в 1969, 1971, 1972, 1973, 1975, 1978, 1980 годах. В Юкспорском тоннеле измерения проводились ежегодно в 1969-72 и 1975-81 годах. Среднеквадратичные случайные погрешности нивелирований не превышали $\pm 0,5$ мм/км. Результаты нивелировок показаны на рис. 19, где изображены графики ΔH по линиям Титан-Кукусумчорр и Титан-Расвумчорр относительно уровня нивелирования 1969 года. На рис. 20 показано изменение во времени отметок некоторых реперов, относительно скального репера 20. Рисунки наглядно иллюстрируют характер движений в пространстве и во времени. Анализируя кривые видно, что до 1975 года движения имели равномерный характер, а в дальнейшем скорость поднятия увеличивалась.

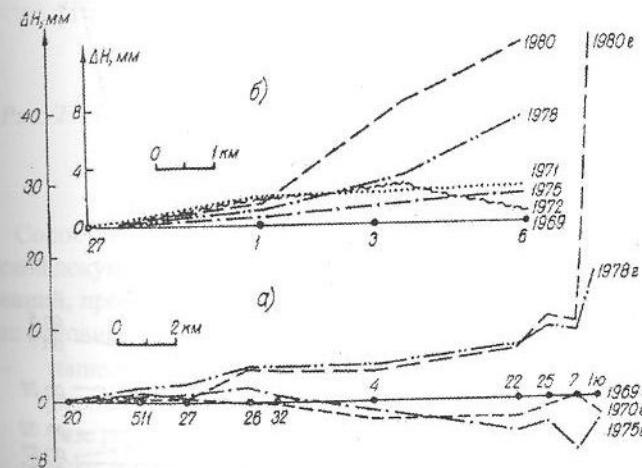


Рис. 19. Результаты повторных нивелировок трассы Титан-Кукусумчорр (а) и Титан – Расвумчорр (б). Графики построены относительно уровня 1969 года.

Измерения в Юкспорском тоннеле показали, что по линии профиля превышение реперов до 1978 года не превосходило 2 мм/год. Наибольшие значения отмечались на участке, протяженностью около 500 м от северного портала (репера 1-18). Нивелирование же 1979 года выявило аномально высокие изменения от-

меток реперов 1-10 (от 6,5 до 56,2 мм) относительно уровня 1978 года. Результаты измерений в Юкспорском тоннеле показаны на рис. 21 и 22. Нивелирование реперов 1-10 за 1969-1981 годы приведены в таблице 4 и позволяют считать, что, несмотря на увеличение годовых объемов извлечения горной массы, темп нарастания деформаций по трассе тоннеля восстановился, т.е. снизился до уровня предыдущих лет.

Авторы объясняют природу таких деформаций разгрузкой массива в результате больших объемов добывающей руды в пределах Саамского карьера и Юкспорского рудника, однако не исключают и влияния тектонических факторов.

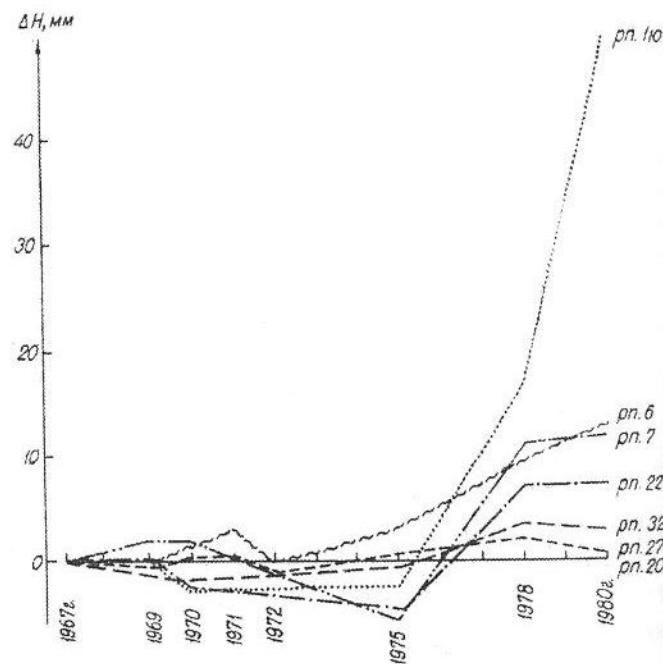


Рис. 20. Изменения смещения реперов во времени по трассе Юкспорского тоннеля относительно репера 20.

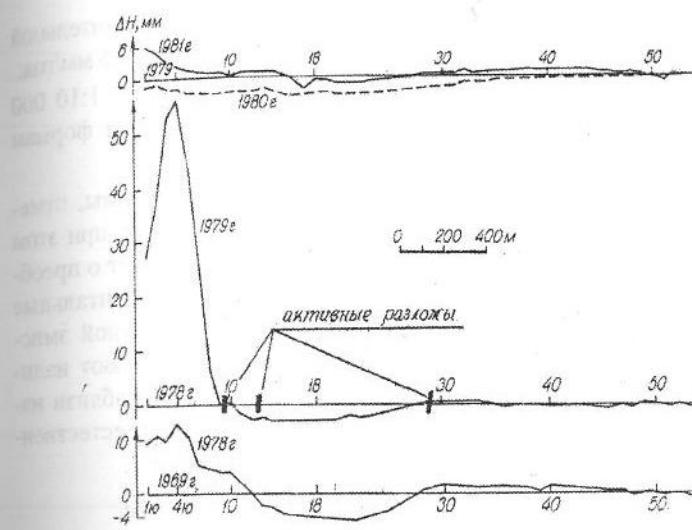


Рис. 21. Результаты повторной нивелировки в Юкспорском тоннеле. За исходный принят репер 50

Сопоставляя данные нивелирований с материалами геологической документации и результатами геоморфологических исследований, проведенных автором, отчетливо проясняются следующие основные факты:

- тоннель пересекают многочисленные крутопадающие разрывные тектонические нарушения, наличие которых при анализе результатов нивелирования не учитывалось, по крайней мере, ни в одной из публикаций об этом не упоминается;
- анализ смещений реперов с учетом местоположения разломов показывает, что зафиксированные аномальные смещения реперов отмечаются на участках, разделяемых разломами, то есть происходили дифференцированные движения блоков по разрывным нарушениям (Рис. 18);
- данные геологической документации подземных горных выработок рудника (Рис. 23), в том числе и тоннеля, указывают на наличие неотектонических движений по разрывным нарушениям, пересекающим тоннель, амплитуда которых со-

- ставляет 10-15 м. Это соответствует средней относительной скорости поднятия за послеледниковый период 1-1,5 мм/год; на топографических картах масштаба 1:5 000 и 1:10 000 эти разломы дешифрируются по тектоническим формам рельефа, что можно видеть на рисунке 15;
- в горных выработках, пересекающих эти разломы, отмечаются динамические формы горного давления, при этом характер, разрушения выработок свидетельствует о преобладании горизонтальных напряжений. Инструментальные наблюдения (метод регистрации электромагнитной эмиссии, метод дискования керна) также подтверждают наличие предельно напряженных участков массива вблизи нарушений, формирование которых обусловлено естественным ходом развития тектонических процессов.

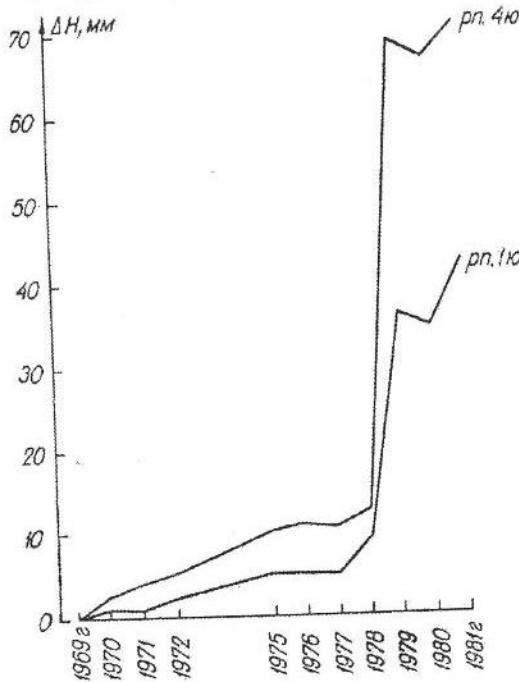


Рис. 22. Изменение во времени отметок реперов в тоннеле относительно репера 50

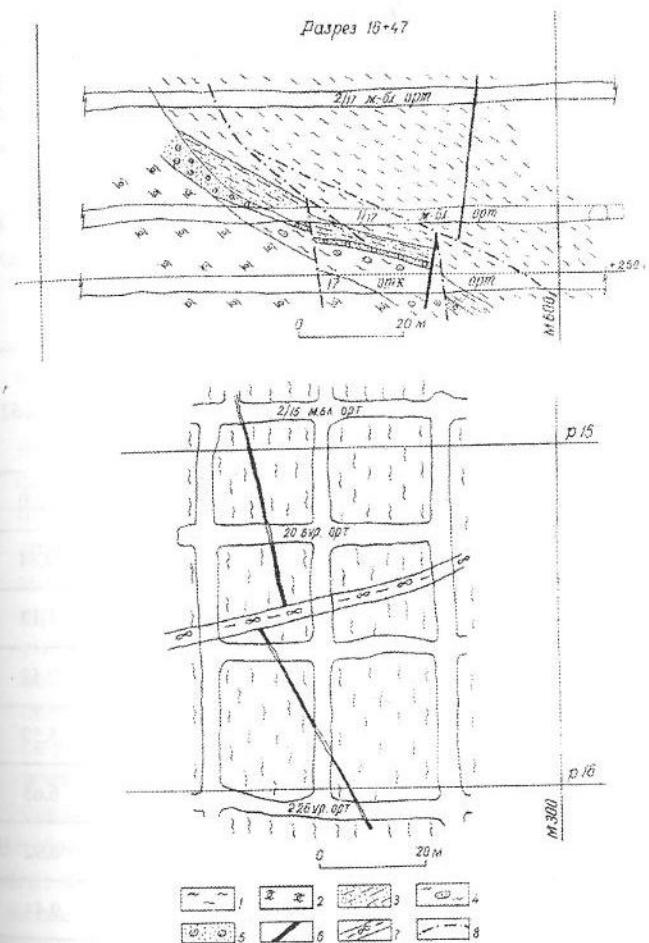


Рис. 23. Современные тектонические движения по документации горных выработок.

а - дайка мончикитов и тестурные разности руд смешены по элементам позднейшей разрывной тектоники (геологический разрез 16+47, гор.+252 м Кировского рудника); б - дайка мончикитов смешена по зоне ширеуштейнизации (план 2 бурового горизонта, бл.15-17 . гор.+252 м Кировского рудника). 1 - линзовидно-полосчатые руды; 2 - крупноблоковые руды; 3 - пятнисто-полосчатые руды; 4 - белые брекчиевидные руды; 5 - богатые брекчиевидные руды; 6 - дайка мончикитов; 7 - зона ширеуштейнизации; 8 - позднейшие неминерализованные трещины.

Измеренное превышение северного портала Юкспорского тоннеля над южным (поднятие репера 1 относительно реперов 52, 53, 54) составило 64,99; 54,07 и 44,5 мм, что соответствует средней скорости 5,42; 4,51 и 3,71 мм/год за период наблюдений (Табл. 4). Протяженность тоннеля составляет 2,6 км.

Таблица 4
Изменение превышений северного и южного порталов
Юкспорского тоннеля в 1969-1981 годах

Год нивелирования	Реперы 54 - 1	Реперы 53-2	Реперы 52 -3
1969	0,00	0,00	0,00
1970	1,27	0,78	0,84
1971	1,08	0,62	1,12
1972	3,09	2,29	2,52
1975	5,87	5,40	5,59
1976	6,56	6,89	6,65
1977	6,31	7,43	6,92
1978,	10,83	11,25	9,44
1979	38,13	49,44	62,20
1980	36,22	48,16	60,22
1981	44,05	54,07	64,99

Сравнение результатов инструментальных измерений с материалами геоморфологических исследований показывает удовлетворительную сходимость. Некоторые различия, проявляются в том, что по геоморфологическим данным скорости движений несколько выше, объясняются следующим:

инструментальные измерения проводились непрерывный период времени (12 лет), и могут характеризовать лишь общую тенденцию в направленности движений. Формы рельефа Хибин свидетельствуют о том, что в прошлом в пределах массива происходили подвижки с весьма значительными амплитудами и сопровождались сильными землетрясениями. Например, при землетрясении, произошедшем 16 апреля 1989 года, амплитуда смещения достигла 9 см. [29, 78, 79].

- линии нивелирования охватывают лишь южную часть Хибин и не могут характеризовать весь массив;
- в начальную стадию после таяния ледников скорость поднятия блоков была значительно выше современной, поскольку кроме тектонических движений большое влияние оказывал процесс разгрузки от ледниковой толщи. В этом вопросе следует согласиться с представлениями Мещерякова Ю.А., который полагает, что сразу после таяния ледника преобладала изостатическая составляющая, которая уменьшалась с течением времени. Через 5000-7000 лет после таяния ледника, мощного, но кратковременного изостатического фактора определяющим фактором становятся устойчивые тектонические движения [80]. В настоящее время проявление изостазии едва ли имеет место, о чем свидетельствуют гравитационные данные [81, 82, 83]

Все блоки земной коры участвуют в своеобразном поднятии и многие из них совершают самостоятельные дифференцированные движения.

Таким образом, результаты геоморфологических исследований тектонических форм рельефа и оценки относительной скорости движения блоков надежно подтверждаются данными высокоточного нивелирования по профилям, расположенным в южном Прихибинье и южной части Хибин.

Таблица 5

Результаты нивелирования реперов 1-10 в транспортном тоннеле горы Юкспор в 1969-1981 годах (относительно репера 50)

№ репера	Паспортные данные от южного гебепхора ногптара	Среднее за 1969- 1981										
		1970-1969	1971-1970	1972-1971	1973-1972	1974-1973	1975-1974	1976-1975	1977-1976	1978-1977	1979-1978	
1	0	+ 1,2	-0,4	+ 1,4	+ 2,9	-0,3	+ 0,1	+ 4,5	+ 27,1	-1,7	+ 7,8	3,6
2	54	+ 0,8	-0,1	+ 1,2	+ 3,0	+ 1,2	+ 1,0	+ 3,8	+ 38,0	-1,3	+ 6,3	4,5
3	108	+ 0,9	+ 0,4	+ 1,1	+ 3,1	+ 0,9	+ 0,5	+ 2,6	+ 52,7	-1,8	+ 5,2	5,5
4	158	+ 2,6	+ 1,6	+ 1,0	+ 5,1	+ 0,6	-0,2	+ 1,9	+ 56,2	-2,2	+ 4,4	5,9
5	208	+ 3,5	+ 1,4	+ 0,9	+ 4,2	-0,7	-0,4	+ 1,6	+ 44,8	-2,9	+ 4,4	4,7
6	262	+ 2,2	+ 0,4	+ 0,8	+ 3,3	-1,0	-1,0	+ 1,4	+ 26,1	-2,7	+ 4,1	2,8
7	312	+ 1,0	+ 0,2	+ 0,7	+ 2,8	-8,9*	-0,9	+ 1,5	+ 6,5	-3,1	+ 4,1	1,1
8	364	+ 0,8	+ 0,3	+ 0,8	+ 2,4	-1,4	-0,6	+ 1,5	-0,3	-2,9	+ 3,8	0,4
10	415	+ 1,0	+ 0,5	+ 0,7	+ 2,3	-1,8	-0,2	+ 0,5	+ 0,5	-2,8	+ 3,3	0,4

2.2.5. Выявление закономерностей иерархичности структуры Хибин

Взаимосвязь явлений в природе обычно поддается математическому описанию, что, в определенной мере, является мерилом справедливости предложенных гипотез и способствует дальнейшему развитию методов исследований.

Для методов моделирования напряженно-деформированного состояния массива и в геодинамических исследованиях большое значение имеют знания о структурной неоднородности среды, с тем, чтобы принимаемая за основу модель наиболее точно отражала исследуемый объект. Одним из важных параметров в этом случае являются средние размеры тектонически активных структурных блоков, слагающих исследуемый район. Это является важным и при выборе масштабов карт в геоморфологических исследованиях тектонических рельефообразующих структур.

Сведения о наличии активных разломов и параметрах иерархически блочной среды в сейсмологических исследованиях позволяют наиболее точно прогнозировать максимально возможную магнитуду землетрясений в регионе и осуществлять оценку сейсмической опасности. Известно, что в природе существует определенная зависимость параметров структурных неоднородностей, характерных или присущих тому или иному уровню иерархии. В данном случае автором сделана попытка установить на основе сравнения размеров активных геодинамических блоков различного ранга, подчиняется ли каким-либо законам структурная система Хибинского массива и сопоставить полученные результаты с известными данными. Для этого с помощью планиметра измерялись площади выявленных блоков и вычислялись их средние значения.

В данном случае для вычисления средней арифметической эмпирического распределения случайной величины X , задаваемого таблицами использовано выражение:

$$X = \sum x_i w_i(x_i) = \frac{1}{n} \sum x_i n_i$$

в котором среднее арифметическое X вполне аналогично выражению математического ожидания MX для теоретического распределения величины X [84]. Здесь можно считать, что “вес” каждого из значений равен единице.

Вычисленные средние значения площади блоков различного ранга составили:

- средняя площадь блоков 2 ранга – 82,9 км²;
- средняя площадь блоков 3 ранга – 12,7 км²;
- средняя площадь блоков 4 ранга – 5,7 км².

В работах [86, 85] горная порода описывается как большая открытая система, состоящая из разномасштабных отдельностей, иерархически распределенных по размерам, которая подчиняется закону геометрической прогрессии со знаменателем 2-5.

Рассматривая эту зависимость на примере выявленного иерархически блочного строения Хибинского массива, можно видеть, что знаменатель геометрической прогрессии изменяется в пределах 2,2-6,5, что несколько отличается от данных, изложенных в указанных работах.

Эти несущественные различия, в целом, удовлетворительно отвечают предложенной в указанных работах гипотезе. Расхождения в значениях коэффициентов могут быть объяснены тем, что общий характер иерархического блочного строения в предыдущих работах определялся на основе результатов, полученных преимущественно при исследовании размеров кусков породы при ее дроблении взрывом, измельчении торфа на мельницах, при реологических взрывах. В этих условиях имела возможность использовать для измерений практически весь материал, подвергшийся измельчению или дроблению.

В данной же работе проведено измерение площадей только тех блоков, которые испытывают движения в настоящее время и, при этом, представлялось возможным установить амплитуды их перемещений на имеющемся картографическом материале соответствующих масштабов. Кроме того, необходимо учитывать и различия как в тектонофизической обстановке различных регионов (уровень напряженности, градиент поля напряжений), так и свойствах пород, слагающих верхнюю часть земной коры. Поэтому, полученный разброс в значениях знаменателя геометрической прогрессии, законом которой подчиняется иерархически блочное строение земной коры, является вполне допустимым и лишь подтверждает результаты, изложенные в работах [86, 85].

Предложенный вывод вполне правомерен, поскольку каждый регион имеет свои особенности геологического развития, которые определяются мощностью земной коры, скоростью деформаций и характером приложения тектонических напряжений.

реологическими свойствами массива и степенью структурной неоднородности.

Таким образом на примере иерархически блочного строения Хибинского массива установлено, что иерархичность тектонически активных блоков подчиняется законам геометрической прогрессии, знаменатель которой составляет 2,2-6,5 и его величина возрастает от меньших по площади блоков к большим.

2.3. ВЛИЯНИЕ РАЗЛОМОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА

При любых движениях блоков по разломам на контактах накапливаются напряжения и деформации, величина которых отличается от значений внутри блоков. Это явление в геомеханике определяется как «краевой эффект». Когда предельные значения этих величин превышают предел прочности для данного типа пород, происходит смещение блоков по разлому. Оно может быть резким-скачкообразным, либо постепенным (плавным). Характер движений по разломам зависит от многих факторов, таких как свойства пород (их способности деформироваться упруго или пластично), свойства пород, слагающих зону разлома, и тектонической активности региона, определяемой скоростью движения блоков, т.е. количеством энергии, поступающей извне для данной системы блоков. Следует исходить из того, что причиной движения блоков в неком ограниченном регионе являются тектонические движения более высокого уровня – планетарные.

Из всех способов оценки поля напряжений в массиве горных пород рассматривались и анализировались данные, полученные при оценке напряженно-деформированного состояния:

- методом разгрузки, который позволяет определить величину и направление действия главных напряжений в различных участках массива
- геофизическими и геомеханическими методами, основанными на регистрации изменений физических свойств пород в зависимости от их напряженно-деформированного состояния
- визуальных обследований состояния контура горных выработок по характеру их разрушения (по внешним признакам удароопасности).

2.3.1. Результаты анализа оценки поля напряжений методом разгрузки для определения их величины и направления действия в выявленных блоках

Измерения напряжений методом разгрузки в пределах эксплуатируемых месторождений осуществлялись совместно со службами ППГУ и ГоИ КНЦ РАН с помощью аппаратуры "УК-Тензор" по схеме торцевых изменений. Обобщенные данные по условию напряженного состояния массива на различных апатитовых рудниках приведены в таблице 3 [39].

Измерения напряжений производились с таким расчетом, чтобы можно было установить влияние различных факторов на изменчивость поля напряжений, которыми являются литологический состав, характер рельефа дневной поверхности и удаленность от границы очистных работ. Так для выявления влияния литологического состава замерные станции располагались на одной и той же глубине, но в различных породах и рудах, для учета влияния рельефа – в вершинах и подножьях гор, а также ниже уровня дна долин.

При статистической обработке результатов измерений выявлено, что разброс данных по каждой замерной станции находится в пределах среднего значения, определяемого квадратичным отклонением:

$$m_{\delta} = \pm(10 \div 20) \text{ МПа}$$

величина которого сохраняется практически независимо от литологического состава и расположения замерных станций относительно рельефа. Для пород с более высокими упругими свойствами характерны более высокие значения измеренных напряжений.

Определенные изменения значений величины горизонтальных напряжений наблюдаются в зависимости от строения рельефа. Так, под дном долин величина измеренных напряжений составляет 40-60 МПа, а по мере подъема к вершинам гор горизонтальные напряжения уменьшаются.

Направление вектора горизонтальных напряжений в плане статистически определяется как субширотное.

Однако анализ данных показывает, что на каждом руднике имеются существенные отличия, заключающиеся в различной ориентировке максимальных горизонтальных напряжений, их величине, а также соотношении максимальных горизонтальных на-

пряжений к горизонтальным. Изменчивость в направлении действия тектонической составляющей свидетельствует о неоднородности поля напряжений в массиве. При этом могут быть как случайные, так и систематические факторы изменчивости поля напряжений. К случайному следует отнести такие, как влияние выработок на распределение поля напряжений, наличие крупных трещин или какой-либо другой структурной неоднородности породного массива. Эти факторы достаточно надежно изучены и учитывались при проведении измерений и обработке результатов. Систематическими факторами, влияющими на изменчивость поля напряжений, являются зона опорного давления от очистных работ и тектонические нарушения, ограничивающие подвижные геодинамические блоки. Зона повышенного горного давления от очистных работ и ее размеры в каждой конкретной ситуации может быть оценена визуально и уточнена инструментально [87], поэтому, анализируя данные по замерным станциям метода разгрузки, можно достаточно надежно оценить влияние разломов на изменчивость общего поля напряжений.

При анализе данных, полученных путем измерения напряжений методом разгрузки, с учетом выявленного блочного строения массива, установлено, что замерные станции на Кукисумчоррском, Юкспорском и Расвумчоррском месторождениях располагаются в различных блоках, которые разделяются между собой активными разломами. Для каждого блока характерным является не только различие в направлении действия максимальных напряжений и его наклона к горизонту, но и величина. Наибольшие значения горизонтальных напряжений отмечаются в Кукисумчоррском блоке, в районе, прилегающем к разлому, отделяющему Юкспорский блок. В пределах Расвумчоррского блока напряжения также велики и достигают значений 60-80 МПа. Из таблицы 3 видно, что направление действия тектонических напряжений на каждом месторождении существенно отличаются. На рисунке 10 показано направление действия горизонтальных напряжений по данным метода разгрузки в выявленных блоках 4 ранга в пределах действующих рудников.

Рассматривая каждый блок и анализируя данные измерений на замерных станциях, становится очевидным, что в пределах выявленных блоков 4 ранга поле напряжений также неоднородно. Установлена определенная закономерность изменчивости поля напряжений в зависимости от структурной неоднородности массива,

обусловленной наличием тектонических нарушений [88]. В таблице 9 приведены результаты измерения напряжений методом разгрузки на Кировском руднике, а на рисунке 24 показана их ориентировка и разрывные нарушения внутри блока 4 ранга, в пределах которого расположено шахтное поле Кукисумчоррского месторождения.

На рисунке видно, что максимальные горизонтальные напряжения, сохранив общее направление действия, в отдельных случаях значительно меняют свою ориентировку. Это обусловлено тем, что замерные станции метода разгрузки расположены в различных блоках 5 ранга, напряженно-деформированное состояние которых определяется наличием активных тектонических нарушений. Характерно, что по данным метода разгрузки вблизи разломов максимальные горизонтальные напряжения возрастают до 70-80 МПа, против 40-50 МПа внутри блоков, а соотношение промежуточного и максимального горизонтальных напряжений достигает на границах блоков 0,7-0,8 против 0,4-0,5 на удалении от разлома, что свидетельствует о увеличении напряженности поля на участках вблизи нарушений.

Таким образом, анализ данных оценки напряжений методом разгрузки показывает, что вид напряженного состояния в различных геодинамических блоках и на их границах определяется разрывными тектоническими нарушениями и зависит от направления действия напряжений и ориентировки нарушений.

2.3.2. Реконструкция полей палеонапряжений по данным съемки трещиноватости и анализ трещин, выявленных на картах и аэрофотоснимках

Изучению трещинной тектоники Хибинского массива посвящены работы многих исследователей [67, 91, 89, 90]. При этом трещиноватость преимущественно увязывалась с кольцевым строением массива и использовалась как признак принадлежности интрузий к кольцевому или коническому типу, то есть ориентировка трещин соотносилась лишь с первично магматическими структурными элементами пород. Однако, при детальном рассмотрении это не является неоспоримым, на что указывалось в работах [39, 91]. Поскольку ряд трещин не согласуется с высказанными представлениями об их происхождении, а их пространственное положение не укладывается в рамки взаимосвязи с магматическими структурными элементами, в работе [88] высказано

предположение, что трещинная тектоника в Хибинах связана с блочным строением и отражает проявление позднейших тектонических процессов. Процесс формирования трещин отражает характер напряженного состояния массива в тот момент времени, в который происходило их образование. Однако поля напряжений существуют и сейчас и, поэтому, трещинная тектоника может отражать характер напряженно-деформированного состояния по принципу «унаследованности».

Таблица 5
Характеристика по условию напряженного состояния массива на отдельных замерных станциях метода разгрузки на Кировском руднике

Местоположение станции	Глубина от поверхности, м	Максимальные горизонтальные напряжения, Мпа	Отношение промежуточного напряжения к главному	Азимут вектора максимальных напряжений, град.	Наклон вектора максимальных напряжений к горизонту, град.
гор. +322 м, разрез 7	100	30+-17	0,4-0,5	120+-30	0+-25
гор. +322 м, разрез 11	300	25+-20	0,6-0,6	90+-30	0+-25
гор. +252 м, разрез 11	400	65+-17	0,5-0,6	60+-30	0+-25
гор. +252 м, разрез 14	430	(27-32) +- 20	0,5-0,6	90+-10	30+-20
гор. +252 м, разрез 8	330	(20-31) +- 20	0,3-0,4	90+-20	35+-20
гор. +252 м, разрез 1	160	(50-60) +- 20	0,4-0,6	60+-20	0+-25
гор. +252 м, разрез 6	450	30+-15	0,5	110+-50	0+-20
гор. +226 м, разрез 22	160	25+-10	0,4	80+-20	0+-20
гор. +252 м, разрез 14	310	40+-20	0,6-0,7	80+-20	0+-20
гор. +172 м, разрез 37	220	(70-75) +- 20	0,7-0,8	110+-30	0+-20

Трещинная тектоника и разрывы различного ранга являются индикатором напряжений в массиве горных пород. Их совокупность характеризует структуру разрушения массива. Наиболее достоверной информацией о некоторых параметрах поля напряжений содержат данные о ориентировке плоскостей нарушения в пространстве и направлении перемещения по ним. Эти данные получены в процессе геологической документации массива горных пород, изучения поверхностей трещин и разрывов с проявлениями следов перемещений в виде борозд и зеркал скольжения, штриховки. В работах [42, 43, 44, 92, 93] показано, что наличие таких характеристик позволяет выделить достоверную информацию о направлениях действия главных напряжений, обусловивших возникновение разрывов и перемещений по ним. Кроме того, строгая постановка этой задачи и ее точное решение позволяет получить достаточно надежную информацию о других параметрах поля, характеризующих соотношение величин главных напряжений.

Съемка трещинноватости сводилась к массовым замерам элементов залегания трещин в действующих выработках откаточных горизонтов +322 м и +252 м Кировского рудника. Протяженность каждого горизонта по простиранию рудного тела составляет около 3 км, а вкрест простирания 0,5-0,6 км. Для исключения влияния трещин разгрузки, образовавшихся в результате ведения взрывных работ, а также трещин отрыва, замерялись лишь достаточно крупные минерализованные или не минерализованные трещины сколового типа. В выработках, пересекающих различные типы пород и руд, съемка производилась раздельно для каждой разновидности, что позволило произвести построение диаграмм трещинноватости для вмещающих пород, белых и богатых руд в отдельности.

Обработка статистических замеров элементов залегания трещин производилась по общизвестным методикам путем построения玫瑰图 (玫瑰图) (玫瑰图), составления круговых точечных диаграмм ориентировки трещин на равноплощадной сетке В. Шмидта. Для удобства обработки и сопоставления диаграмм между собой, точечные диаграммы пересчитывались в опроцентованные, на которых отсигрывались изолинии относительной плотности трещин. Всего определены элементы залегания более 6000 трещин.

Известно, что при реконструкции палеонапряжений по трещинной тектонике наиболее важным моментом является выявление сопряженных систем сколовых трещин. Но установление таких систем на апатитовых рудниках Хибин весьма затруднительно в виду малых смещений по трещинам, а зеркала и борозды скольжения завуалированы позднейшими низкотемпературными образованиями. Поэтому рассматривались лишь те системы трещин, достоверность сопряжения которых установлена.

Методами тектонофизического анализа сопряженных сколовых систем трещин восстанавливалось поле палеонапряжений и результаты сравнивались с данными инструментальных измерений поля напряжений, полученных с помощью метода разгрузки. При этом учитывалось блочное строение шахтного поля, то есть сопоставлялись данные оценки напряжений в одном и том же блоке в различных блоках.

Для примера рассмотрим результаты замеров элементов залегания сколовых трещин в подстилающих породах на двух участках горизонта +322 м, разделенных между собой крутонападающей зоной ширешизации северо-восточного-восточного простирания. Один участок расположен в пределах 9, 10, 11 откаточных ортов (109 замеров), другой – в районе 18, 19, 19а откаточных ортов (220 замеров). Эти участки расположены в различных геодинамических блоках 5 ранга. Диаграммы трещинноватости представлены на рис. 25. Более подробно эти результаты изложены в работе [87, 88].

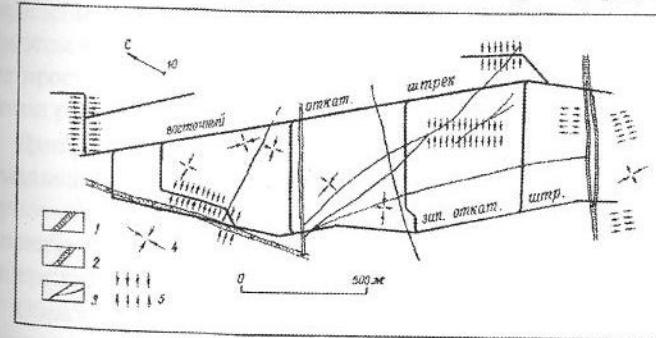


Рис 24. Распределение горизонтальных напряжений

на гор. +252 м Кировского рудника.
1 – Саамский разлом; 2 – разлом Ворткеуай; 3 – разломы пятого ранга; 4 – распределение направления действия горизонтальных напряжений по данным метода разгрузки; 5 – направление действия горизонтальных напряжений по разрушению выработок.

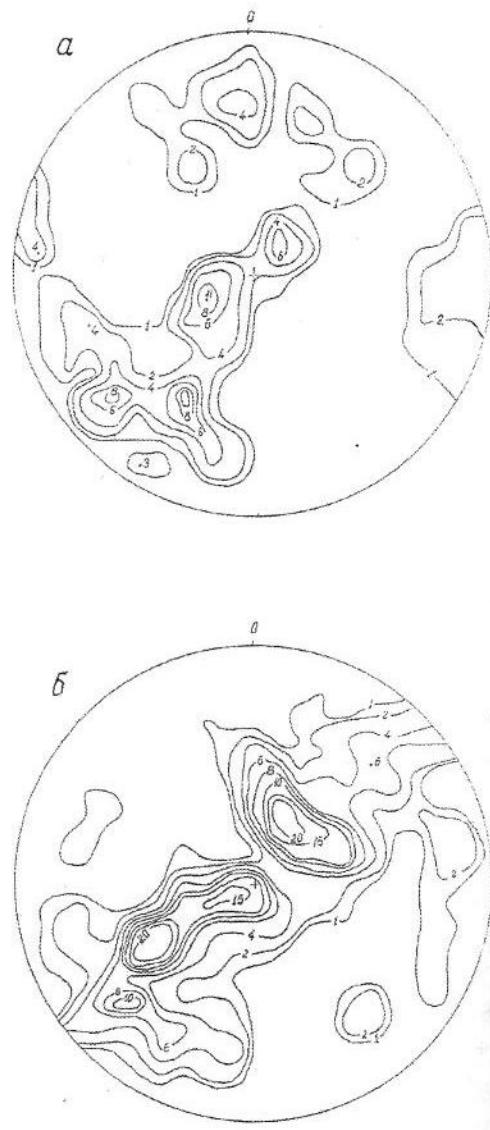


Рис. 25. Диаграммы трещиноватости не гор. +322 м
Кировского рудника
а – на участке 9, 10, 11 отк. ортов; б – на участке 18, 19, 19а отк. ортов.

Сопоставление полученных данных с результатами инструментальных определений поля напряжений методом разгрузки показало удовлетворительную сходимость. Это свидетельствует о том, что методом реконструкции палеонапряжений на основе анализа трещинной тектоники можно оценивать направление действия и современных напряжений в массиве. Однако широкое использование этого способа затруднено из-за трудности выявления сколовых сопряженных трещин.

Результаты реконструкции палеонапряжений по трещинной тектонике дали основание для исследований взаимосвязи крупных трещин, выявленных на топографических картах масштаба 1:25000, которые являются признаками разломов 5 ранга, с полями напряжений в блоках 4 ранга.

В данном случае применен принцип «от частного – к общему», в отличие от принципа «от общего – к частному», использованному в работе при выявлении тектонически активных блоковых структур.

Такой же подход использован и при анализе более крупных трещин. Для этих целей, трещины, выявленные на картах масштаба 1:25 000, наносились на карту блочного строения (Рис. 10). В процессе работы для каждого блока строились розы-диаграммы ориентировки трещин. На рисунке видно, что ориентировка и распределение трещин в различных блоках существенно отличаются, при этом каждому блоку присущее свое преобладающее направление простирания трещин. Отмечается закономерность в том, что вблизи разломов трещины ориентируются по нормали к ним.

Данные метода разгрузки показали, что вблизи разломов максимальные напряжения меняют свое направление на перпендикулярное разлому. В этом случае растягивающие или минимальные напряжения ориентируются параллельно нарушению, а значит, эти трещины являются трещинами отрыва.

Образование трещин отрыва вблизи разломов происходит на фоне сжатия, при условии, что одно из напряжений, в направлении действия которого образуются трещины, является преобладающим, а напряжения, действующие по нормали к плоскости отрыва, являются минимальными по величине, или растягивающими. В данном случае сжимающее напряжение действует перпендикулярно простиранию более крупного разлома.

Разрывные тектонические нарушения в Хибинах формировались на фоне дифференцированного поднятия, в преимущественно условиях сжатия. Движения носили и носят глыбовый, грабено-горстовый характер. Поэтому максимальные горизонтальные напряжения вблизи разломов ориентировались по нормали к ним, о чем свидетельствует и простирание трещин, по которым можно судить и о преимущественном направлении действия главных напряжений.

Интерпретируя таким образом направленность роз-диаграмм трещин отрыва, можно судить о направлении действия максимального сжимающего напряжения в том или ином блоке, о направленности возможных внезапных подвижек, что весьма важно не только при выявлении напряженно-деформированного состояния массива, но и для определения механизмов очагов землетрясений, оценки их магнитуды. Приведенные данные позволяют полагать о взаимосвязи палеонапряжений в Хибинах с современными действующими напряжениями по принципу унаследованности, а трещинная тектоника является диагностическим признаком, на основе которого возможно установление не только палео, но и современных полей напряжений.

Таким образом, разрывные тектонические нарушения определяют характер поля напряжений, а вид напряженного состояния в блоках и на их границах меняется в зависимости от направления действия максимальных напряжений и ориентировки разрывных тектонических нарушений.

Исследования трещинной тектоники на основе методов тектонофизической реконструкции палеонапряжений позволили оценить современные поля напряжений в выявленных блоках с учетом их тектонических границ и влияния разломов. Направление действия главных горизонтальных напряжений в различных блоках, установленные на основе тектонофизического анализа, практически совпадают с результатами оценки напряжений методом разгрузки, что позволяет использовать такой подход уже на стадии геологосъемочных и геологоразведочных работ без привлечения дорогостоящих, трудоемких и не всегда возможных инструментальных методов оценки напряжений.

В методическом плане оказалось весьма полезным использование принципа от общего к частному, когда выявление особенно-

стей геологического строения осуществляется сверху вниз, то есть от региональных структур к локальным, в сочетании с решением обратной задачи. Суть ее заключается в том, что используя методы тектонофизического анализа разрывных структур, начиная от трещин различной протяженности и до разломов различного ранга реконструируется тектонофизическая обстановка в геодинамических блоках. Этим самым проверяется правильность результатов и выводов, полученных при геодинамических исследованиях.

2.3.3. Величина зон влияния разломов на напряженно-деформированное состояние массива по данным визуальных и инструментальных наблюдений

Разработка Хибинских апатито-нефелиновых месторождений ведется с 1929 года. Сведения о динамических проявлениях горного давления на рудниках имели отрывочный характер до 1980 года, и только после создания службы прогноза и предотвращения горных ударов эти наблюдения стали систематизироваться.

В скальных массивах под воздействием высоких напряжений наблюдаются явления хрупкого разрушения с вывалами породы на контуре выработок, что приводит к увеличению их поперечного сечения. На апатитовых рудниках Хибин горное давление обычно проявляется в следующих формах:

- мгновенное хрупкое разрушение пород под действием высоких напряжений. Сопровождается звуковым и сейсмическим эффектами и выбросом породы в горные выработки (шелушение, стреляние, динамическое заколообразование, микроудары, собственно горные удары, горнотектонические удары). Объем выброса достигает нескольких десятков и даже сотен тонн, а сейсмический эффект сопоставим со слабыми землетрясениями;
- вывалы на контуре выработки, на участках сильно трещиноватых, ослабленных и шпреуштейнизованных пород.

Характерной особенностью на апатитовых рудниках является разрушение прочных пород под воздействием горного давления на малых глубинах, начиная со 100 м от поверхности, что обусловлено действием высоких горизонтальных сжимающих напряжений. В таком случае хрупкое разрушение приурочено к кровле выработки, или ее сопряжениям со стенками и проявляет-

ся в виде шелушения, динамического заколообразования и стрелования пород (Рис. 26а, б).

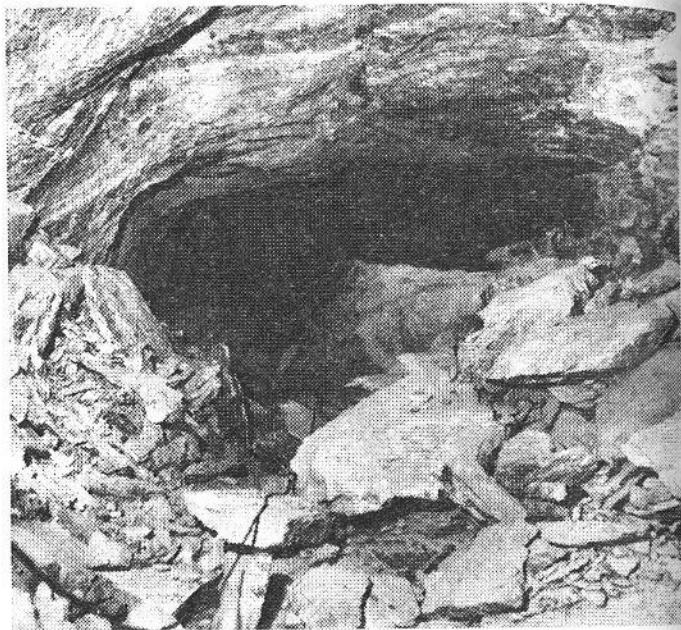


Рис. 26а. Горный удар в скреперном штреке 1215,
гор. +252 м Кировского рудника

Систематические визуальные и инструментальные наблюдения, проводимые автором совместно со специалистами служб рудников, позволили определить закономерности разрушения выработок в зависимости от горнотехнических и горногеологических условий.

Анализ горных ударов, произошедших на апатитовых рудниках Хибин показал, что факторы, влияющие на удароопасность могут быть разделены на природные и техногенные.

К природным факторам, отражающим особенности геологического строения и тектонической обстановки на месторождениях, относятся наличие разрывных нарушений, высокая тектоническая напряженность пород, различие механических свойств пород и руд и их анизотропия, неоднородность поля напряжений, а также наличие современных дифференцированных тектониче-

ских движений в регионе. Немаловажное влияние оказывает и гористый рельеф, с перепадами высот между дном долин и вершинами гор в 400-500 м, то есть глубина расположения выработок от дневной поверхности.

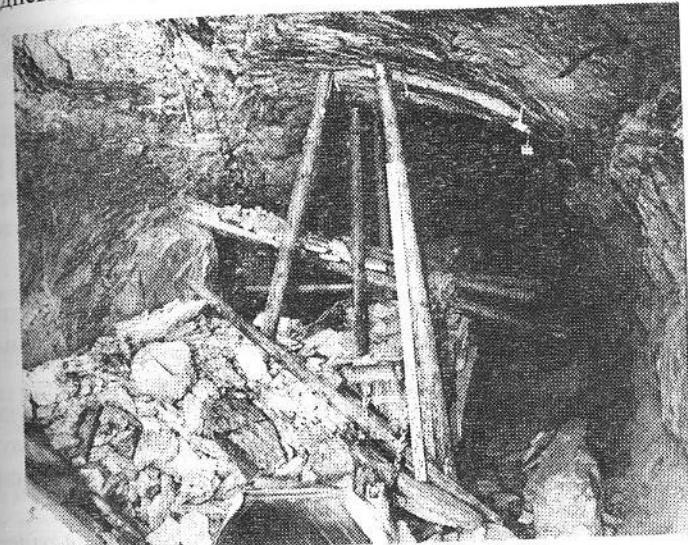


Рис. 26б. Горный удар в обгонной выработке гор.
+ 172 м Кировского рудника

(под завалом породы находится погрузочная машина)

Техногенные факторы обусловлены особенностями применяемой системы разработки, заключающимися в том, что самообрушение покрывающих пород до поверхности происходит не сразу после отбойки руды в секции, а позднее, после начала выпуска, в результате чего образуются консольные зависания, приводящие к увеличению напряжений в зоне опорного давления. Кроме того применяемая технология требует проведения выработок днища блока и откатки непосредственно в зоне опорного давления. При этом изрезанность массива на таких участках велика.

При совместном воздействии этих факторов по месту проявления горные удары могут быть разделены на две группы:

- проявления в зоне влияния очистных работ;
- проявления вблизи тектонических разрывных нарушений.

Анализ горных ударов, произошедших на рудниках Хибин проведен с учетом влияния основных структурных и горнотехнических факторов удароопасности.

Такими факторами являются:

- зона опорного давления от очистных работ. Этот фактор оценивался по расстоянию от границы очистного про странства до места проявления горного удара;
- влияние выработок друг на друга, при этом выработки счи тались сближенными, если расстояние между ними меньше или равно четырем диаметрам большей из них;
- глубина расположения выработок от поверхности;
- расстояние от разлома.

Подробно все случаи проявления горных ударов на рудниках Хибин описаны в Каталогах горных ударов, опубликованных во ВНИИМ.

Рассматривая влияние на удароопасность каждого из указанных факторов по частоте проявления видно, что во всех случаях горные удары происходили вблизи тектонических нарушений, на удалении от них не более 30-40 м.

Семь горных ударов произошло вне зоны влияния очистных работ и по природе и механизму горнотектоническими, т.е. в результате подвижки по блоков по разломам под совместным воздействием высоких горизонтальных напряжений в массиве и техногенных нагрузок. В десяти случаях горные удары произошли в сближенных выработках в зоне опорного давления от очистных работ. Эта группа горных ударов удалена на расстояние до 40 м от разломов. При этом, в аналогичных условиях, на удалении от нарушений более 40 м, горных ударов не происходило, что свидетельствует о большом вкладе разрывных нарушений на удароопасность.

Визуальные наблюдения за напряженно-деформированным состоянием массива и характером разрушения горных выработок на рудниках, систематически проводимые с 1980 года, позволили накопить большой фактический материал. Анализируя данные о характере и формах разрушения горных выработок, можно с достаточной надежностью судить о виде напряженного состояния массива и направлении действия максимальных напряжений на том или ином участке.

Высокие напряжения в скальных массивах реализуются в виде хрупкого разрушения пород на контуре горной выработки. В случае преобладания горизонтальных напряжений разрушения проявляются на ее кровле, а при преобладании вертикальных напряжений разрушаются стенки. Известно, что разрушение породы на контуре выработки в виде стреляния происходит при напряжениях в массиве больших или равных $0,8 [\delta_{ck}]$. В этом случае возможны также и микроудары. При значениях напряжений в массиве от $0,5[\delta_{ck}]$ до $0,8 [\delta_{ck}]$ на контуре выработки наблюдается хрупкое разрушение пород в виде шелушения, вследствие чего происходит постепенное увеличение поперечного сечения выработок.

Анализ материалов визуальных и фотометрических наблюдений за характером разрушения горных выработок позволил установить, что выработки, ориентированные по направлению действия максимальных напряжений, разрушаются более чем в два раза медленнее, по сравнению с выработками, ориентированными перпендикулярно направлению главных напряжений.

Так для условий Кировского рудника орты ориентированы по направлению действия максимальных напряжений и скорость их разрушения составляет $1,22 \text{ м}^2/\text{год}$, в то время как поперечное сечение штреков увеличивается за счет разрушения под воздействием горного давления на $2,83 \text{ м}^2/\text{год}$. На рис. 27 показано увеличение формы поперечного сечения выработок по данным фотосъемки на Кировском руднике.

В общем случае разрушение горных выработок происходит под влиянием нескольких факторов (в данном случае использованы материалы из фондов геолого-маркшейдерской службы и службы прогноза и предотвращения горных ударов рудников):

- разрушение выработок по естественным плоскостям ослабления и зонам шпреуштейнизации – 7-8%;
- разрушение выработок от динамического воздействия массовых взрывов при отбойке руды – 25-30%;
- разрушение выработок под воздействием горного давления – 60-70%.

Анализ данных визуального обследования горных выработок позволил установить закономерность в характере разрушения выработок вблизи зон разломов, в зонах их влияния. Так, вблизи разломов 4 ранга интенсивное разрушение на кровле в виде стре-

ления и динамического заколообразования отмечается в выработках, параллельных разлому, что свидетельствует о высоких сжимающих напряжениях, ориентированных перпендикулярно разлому. А в выработках, проведенных перпендикулярно этому же нарушению, шелушение и заколообразование отмечается практически по всему их контуру. Это говорит о том, что и промежуточное главное напряжение в зоне влияния разлома достигает больших значений и ориентировано вдоль плоскости разлома. По данным метода разгрузки напряжения на таких участках возрастают на 30-40%.

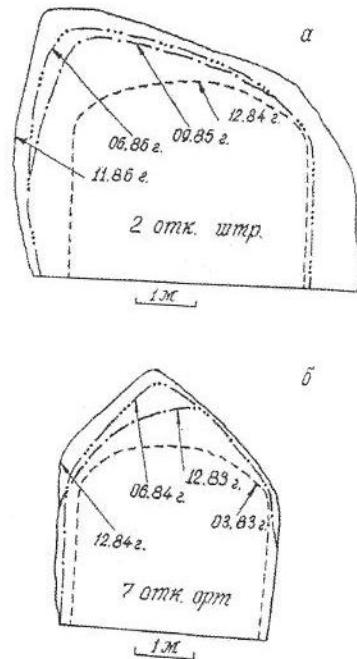


Рис. 27. Форма поперечного сечения горных выработок при разрушении под воздействием горного давления по данным фотосъемки сечений.
а – разрушение штреков; б – разрушение ортов.

Вблизи диагональных нарушений (разломов 5 ранга) выработки также разрушаются в виде шелушения, заколообразования и стреляния пород на кровле. У поперечных нарушений 5 ранга разрушаются лишь выработки, ориентированные перпендикулярно раз-

лому. Направление действия главных горизонтальных напряжений в массиве на гор. +252 м Кировского рудника показано на рис. 24. В высоконапряженных блочных массивах повышенные напряжения формируются вблизи разломов и величина зоны их влияния различна. Установлена определенная зависимость величины зоны влияния разрывного нарушения на удароопасность от его мощности.

Оценка размеров зоны влияния разлома осуществлялась по горным выработкам, расположенным вблизи нарушения. Участки с внешними признаками удароопасности (стрелянием, динамическим заколообразованием, шелушением) наносились на планы горизонтов. Тектонические нарушения по мощности подразделялись на пять групп: до 2 м, 2-4 м, 4-6 м, 6-8 м, 10 м и более.

По каждой выработке с учетом мощности разлома делались выборки величины участков с внешними признаками удароопасности (величины зоны влияния разлома). Расстояние измерялось по нормали в обе стороны разлома. На рис. 28 показана гистограмма распределения размеров зоны влияния разлома в зависимости от его мощности. Какого-либо различия ее размеров в лежачем и висячем крыльях не установлено, практически они равны.

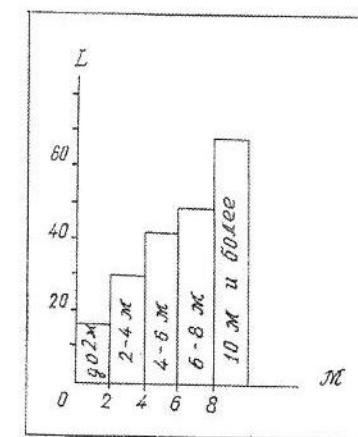


Рис. 28. Гистограмма распределения размеров зоны влияния разломов в зависимости от их мощности.

L – Величина зоны влияния разлома (м);
M – мощность самой зоны разлома (м).

В общем случае внешние признаки повышенных напряжений отмечаются в выработках с расстояния, равного 5-10 мощностей самой зоны разлома. При этом величина зоны влияния разлома мощностью до 10 м в 7-10 раз превышает его мощность, а у разломов, мощность которых более 10 м, внешние признаки удароопасности отмечаются с расстояния, в 5-7 раз превышающего его мощность.

Естественно, что в действительности зона влияния разлома имеет значительно большие размеры, поскольку в данном случае оценивались лишь участки с внешними признаками удароопасности, то есть предельно напряженные его части.

Инструментальные измерения для контроля за состоянием массива вблизи тектонических нарушений проводились с использованием методов регистрации естественной электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) с помощью аппаратуры ЕГ-9 и ЕГ-9м, дискования керна, а также с привлечением данных, получаемых на основе непрерывного телеметрического контроля за сейсмической активностью массива (автоматизированная система контроля за состоянием массива - АСК СМ), созданная на руднике для прогноза горных ударов.

Анализ полученных данных показал хорошую сходимость результатов и подтвердил наличие повышенных напряжений вблизи разломов. На рис.29 показаны замерные станции № 31 и № 39 по оценке категории удароопасности методом дискования керна, расположенные вблизи тектонических нарушений, представленных диками мончикитов.

В том и другом случаях выработки проведены по апатитовым рудам, механические свойства которых на участке измерений практически одинаковы, но по прочности руды в 1,5-1,7 раза ниже, чем мончикиты. На рисунке видно, что вблизи дайки мончикитов размеры зоны дискования больше и, при этом, толщина дисков меньше. Буровой керн, полученный из самой дайки, также раздискован. Это свидетельствует о повышенных напряжениях в массиве, обусловленных влиянием тектонического нарушения.

Результаты измерений естественной электромагнитной эмиссии в режиме профилирования горных выработок, пересекающих активные разломы, показывают, что вблизи разломов отмечается повышение уровня естественного электромагнитного излучения (ЕМИ).

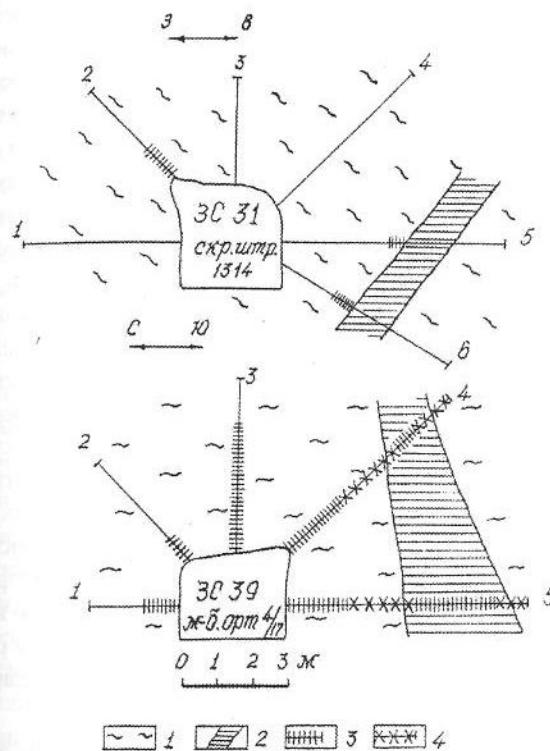


Рис. 29. Замерные станции 31 и 39 по оценке категории удароопасности методом дискования керна
(Кировский рудник, гор. +252 м).

1 – апатито-нефелиновые руды; 2 – Дайка мончикитов;
3 – диски керна толщиной 1-2 см; 4 – диски керна толщиной менее 1 см.

Этот метод основан на явлении разделения электрических зарядов на бортах трещин, образующихся при хрупком разрушении породного массива. Релаксация зарядов может происходить путем пробоя газового или воздушного промежутка трещины по достижении критического уровня разности потенциалов.

Участок пробоя при этом является единичным кратковременным излучателем электромагнитного поля. Чем интенсивнее процесс образования микротрещин на напряжением участке, тем больше в единицу времени образуется единичных источников импульсного естественного электромагнитного излучения. Основы метода изложены в методических указаниях по сейсмоакустическим и электромагнитным методом получения критериев степени удароопасности [94]. Для условий Хибинских месторождений разработана методика оценки напряженного состояния массива методом естественного электромагнитного излучения, которая использовалась в режиме профилирования выработок, зондирования шпуров или скважин и их дифференциального каротажа [100]. Интегральной характеристикой ЕЭМИ на участке измерений служит количество превышений амплитуды сигнала над порогом срабатывания регистратора эмиссии за представительный интервал времени. На рисунках 30 и 31 показано изменение электромагнитной эмиссии вблизи разлома. Измерения проводились при одних и тех же параметрах на точках, расположенных через пять метров одна от другой. На рисунках ясно видно увеличение количества импульсов излучения при приближении к разлому (пикет 15), также довольно отчетливо выщеляется зона влияния разлома. В общем случае в зоне влияния разлома количество импульсов увеличивается на 35-50%, а на удароопасных участках в 1,5-2 раза.

Анализ данных сейсмической активности массива на Кировском руднике позволяет считать, что наибольшее количество сейсмических явлений, зарегистрировано сейсмостанцией рудника, приурочено непосредственно к самим нарушениям, или располагается в зоне их влияния. Так, за период с 28 июля по 31 августа 1986 года зарегистрировано 515 событий (толчков в массиве) с энергией от 10^2 дж до $6,2 \cdot 10^4$ дж. Эти данные были проанализированы следующим образом:

- сейсмические события, координаты которых совпали с положением установленных (существующих) нарушений, или попали в зону влияния разлома, величина которой определялась до 40 м по обе стороны разлома, считались обусловленными влиянием тектоники;
- сейсмические события, произошедшие в контурах границ очистной выемки и удаленные от границ отбойки до 100 м,

то есть расположенные в зоне повышенного горного давления от очистных работ, относились к проявлениям, вызванным влиянием очистных работ;

- сейсмические события, произошедшие в зоне повышенного горного давления от очистных работ и в зоне влияния разлома, выделялись в отдельную группу и считалось, что они произошли за счет совместного влияния указанных факторов;
- остальные события происходили вне зон влияния очистных работ и разломов.

По этим группам события распределились следующим образом:

- в зоне совместного влияния очистных работ и разломов - 8% - в зоне влияния очистных работ 18%
- в зоне влияния тектонических нарушений 33%
- остальные - 41%, произошли на участках, где развиты трещины, протяженностью в несколько десятков метров.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что большинство толчков в массиве происходит по тектоническим нарушениям или вблизи них, то есть зоны разломов являются наиболее сейсмически активными. Сейсмические события, приуроченные к нарушениям, имеют наибольшую энергию и на один-два порядка превышают остальные.

На рисунке 13 показано расположение Саамского разлома и отмечены толчки, произошедшие в массиве по данным сейсмостанции за период с 24 марта по 6 апреля 1986 года. Всего зарегистрировано 31 событие с энергией от 10^2 дж до $2 \cdot 10^5$ дж. Участок расположен за пределами влияния очистных работ. На рисунке ясно видна линейная группировка сейсмических событий, располагающихся вдоль нарушения. В зоне влияния разлома произошло три горных удара, которые на рисунке помечены условным знаком. Зона влияния разлома показана на рисунке пунктирной линией. Более подробно сейсмичность зон разломов и в прилегающей к ней части массива рассмотрена ниже.

В общем случае размеры зоны влияния разломов (зоны повышенных напряжений) по данным инструментальных и визуальных наблюдений зависят от мощности самого разлома и составляют:

$$M_3 = kM$$

где: M_3 - размеры зоны влияния разлома, м
 M - мощность разлома;
 k - коэффициент пропорциональности, для разломов мощностью до 10 м $k = (7 \div 10)$, для разломов мощностью более 10 м $k = (5 \div 7)$.

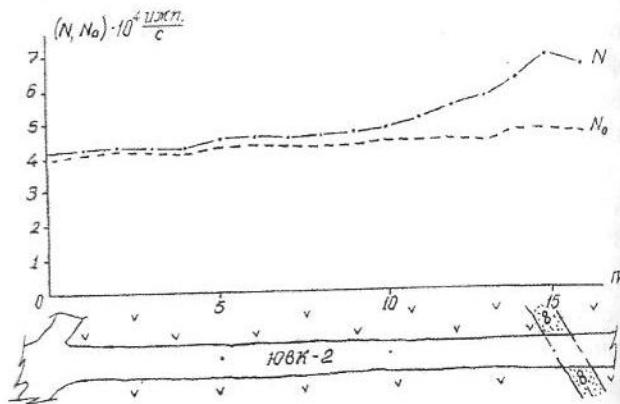


Рис. 30. Изменение электромагнитной эмиссии в зоне влияния разлома.
 Разлом представлен зоной шире штейнизации
 (Кировский рудник, гор. +172 м, южный вентиляционный квершлаг).

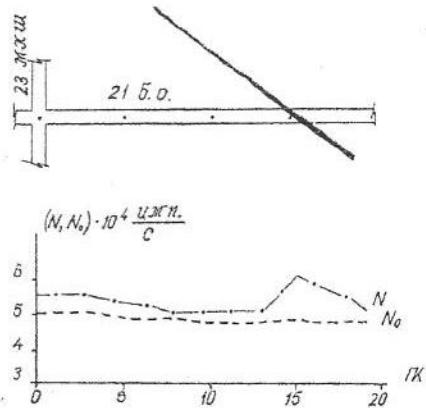


Рис. 31. Изменение электромагнитной эмиссии в зоне влияния разлома,
 выполненного дайкой мончикитов
 (21 буровой орт, блок 17-19, гор. +252 м Кировского рудника).

Знания о величине зоны влияния разломов на напряженно-деформированное состояние имеют важное значение для прогноза и предотвращения горных ударов на месторождениях, склонных к горным ударам, а также в сейсмологических исследованиях, особенно при оценке сейсмической опасности и сейсмическом микрорайонировании, которое осуществляется на основе сейсмогеологических исследований. В этом случае учитывается распределение эпицентров землетрясений, наличие сейсмодислокаций геологическая обстановка, в которой главное значение имеет разрывная тектоника. Зоны активных разломов представляют наибольшую сейсмическую опасность для данного района.

Разломная тектоника широко исследуется и в инженерно-геологических и гидрогеологических изысканиях, поскольку зоны разломов являются местами разгрузки подземных вод. Кроме того, при наличии активных разломов строительство каких-либо объектов промышленного и гражданского строительства в зонах их влияния сопряжено с дополнительными затратами на обеспечение устойчивости сооружений, а также на поддержание в процессе эксплуатации.

В результате проведенных геодинамических исследований в пределах Хибинского массива выявлено его иерархически блочное строение на уровне блоков 4 ранга включительно, а в пределах эксплуатируемых месторождений установлены разломы 5 ранга.

Исследования показали:

- Хибинский щелочной массив проявляет тектоническую активность с послеледникового периода по настоящее время. Движения имеют грабено-горстовый характер, различные геодинамические блоки испытывают преимущественно вертикальные дифференцированные движения. Относительная средняя скорость движений за послеледниковый период по данным геоморфологических исследований составляет для блоков 2 ранга 0,1 - 52,6 мм/год, блоков 3 ранга - 0,4 - 65 мм/год, блоков 4 ранга - 0,3 - 70 мм/год. Сопоставление результатов геоморфологических исследований с данными многолетних геодезических наблюдений показало хорошую сходимость;
- движения блоков нашли отражение в формах рельефа, проявившихся в виде глубоко врезанных долин, ущелий,

- расщелин, уступов, разделяющих блоки с различными гипсометрическими уровнями;
- установлены возрастные взаимоотношения разломов различного ранга. Так разломы 2 ранга, выраженные в рельефе в виде глубоко врезанных долин пологими, эродированными ледником стенками, заложены в доледниковое время. Дно таких долин перекрыто моренными отложениями. Разломы 3 и 4 рангов в рельефе выражены в виде ущелей и расщелин с отвесными стенками, а также уступами. Какие-либо следы ледниковой эрозии отсутствуют. На их дне имеются лишь продукты разрушения стенок. По времени заложения они могут быть и доледниковыми, однако их активность, то есть подвижки по ним, проявлялись лишь после таяния ледников. Выявленные разломы подтверждены документацией обнажений, горных выработок и скважин;
- на основе анализа трещинной тектоники реконструированы поля палеонапряжений. Сопоставление с данными оценки напряжений методом разгрузки показало, что современные поля соответствуют палеонапряжениям по принципуunalследовательности, при этом каждому геодинамическому блоку присуще только свойственное ему поле напряжений;
- в нетронутом массиве горных пород действует неравнокомпонентное поле напряжений, неоднородность которого определяется блочным строением. Максимальные напряжения являются горизонтальными и превышают гравитационную составляющую поля напряжений в 3-5 раз. Промежуточные главные горизонтальные напряжения составляют 0,3-0,8 от максимальных;
- вблизи тектонически активных разломов формируются участки повышенных напряжений, размеры которых зависят от ранга разлома и его мощности. Так, для разломов мощностью до 10 м размеры зоны их влияния в 7-10 раз превышают мощность, а у разломов, мощность которых более 10 м ее размеры в 5-7 раз больше мощности самого разлома. В таких зонах максимальные сжимающие напряжения ориентируются по нормали к плоскости разлома, их величина возрастает в среднем, по данным метода разгрузки, до 70-80 МПа, против 40-50 МПа внутри блоков,

а соотношение промежуточного и максимального горизонтальных напряжений достигает на границах блоков 0,7-0,8 против 0,4-0,5 на удалении от разлома;

- иерархическое блочное строение активных блоков в пределах Хибинского массива подчиняется закону геометрической прогрессии со знаменателем 2,2-6,5, что несколько отличается от данных, полученных другими исследователями для блочной среды, однако справедливо отражает такие тенденции;

- достоверность геодинамических исследований блочного строения массива, проведенных по принципу от общего к частному, подтверждена решением обратной задачи, заключающейся в том, что используя методы реконструкции палеонапряжений, установлены различия тектонофизической обстановки в выявленных геодинамических блоках, что является весьма полезным в методическом отношении.

3. СЕЙСМИЧНОСТЬ ХИБИНСКОГО МАССИВА

Первым зарегистрированным землетрясением в Хибинах явилось землетрясение 23 сентября 1948 года. Это событие описано в работах [95, 96], согласно которым в интервале около двух с половиной часов отмечено три толчка, ощущавшихся в пос. Кукисумчорр интенсивностью до 4 баллов. Толчки сопровождались подземным гулом, напоминающим звук низколетящего самолета.

Предположительно, очаг землетрясения располагался в пределах массива горы Кукисумчорр или несколько севернее. Следующие землетрясения произошли 8 и 31 августа 1955 года, интенсивностью 3-4 балла [97, 98, 99]. Одно из них было зарегистрировано сейсмической станцией «Пулково» и экспериментальной сейсмической установкой вблизи Москвы.

В зоне южного контакта Хибинского массива с вмещающими породами 9 февраля 1960 года произошло землетрясение, ощущавшееся в Кировске интенсивностью 3-4 балла. Это было первое землетрясение, которое зарегистрировано сейсмостанцией «Апатиты», введенной в работу в феврале 1956 года [100].

Следующее землетрясение в Хибинах было зарегистрировано лишь 30 сентября 1974 года. Его интенсивность составляла до 5 баллов. Очаг располагался в районе пос. Кукисумчорр, на глубине до 10 км.

Рост сейсмической активности в районе Кировского и Юкспорского рудников отмечен с 1981 года, что проявилось в виде увеличения числа и силы горных ударов. Наиболее сильные из них (8 января, 18 августа, 29 сентября 1981 года) вызвали ощущения согревания и их магнитуды составляли 1,5, 3,5, 3,2 соответственно. 17 мая 1981 года, после взрывания проходческих забоев на Кировском руднике, отмечена лавина сейсмических толчков в массиве, 18 из которых были зарегистрированы сейсмостанцией «Апатиты», удаленной на 18 км. 29 августа 1982 года на Юкспорском руднике был произведен массовый взрыв для отбойки руды. Величина заряда составляла 106 т гранулированного аммонита. Через два с половиной часа после взрыва произошел сильный толчок, интенсивность которого превысила 5 баллов. По времени толчок совпал с взрывом заряда на карьере, величиной 4,6 т. Судя

по сейсмограммам, событие на какое-то мгновение опередило взрыв. Записи, полученные на всех приборах, начинаются резко, очень сильным вступлением и не соответствуют записи такого маломощного заряда. По оценке взрывного эквивалента события оно соответствует 45-50 тыс. т взрывчатого вещества [27].

С восьмидесятых годов на подземных рудниках стали происходить и горнотектонические удары, обусловленные внезапными подвижками блоков по тектоническим нарушениям в результате перераспределения напряжений в массиве при ведении горных работ. Эти события регистрировались сейсмостанцией «Апатиты» как мелкофокусные землетрясения, магнитуда которых превышала три единицы, а по интенсивности сейсмического воздействия на промплощадки рудников и близрасположенные населенные пункты они соответствовали землетрясениям в 4-5 баллов. Результатом их воздействия являлись разрушения в действующих рудниках, что приводило к приостановке работ, имелись несчастные случаи с работниками, отмечались случаи повреждения не только производственных зданий на территориях промплощадок рудников, но и жилых зданий.

Таким образом, появились некоторые вопросы, наиболее актуальными из которых являются:

- пространственно-временные параметры сейсмичности с учетом блочного строения массива, ранжированного по порядку структур, выявить сейсмически активные блоки и разломы и установить взаимосвязь сейсмичности со строением массива;
- каким образом влияют широкомасштабные горные работы на проявления сейсмичности в тектонически нарушенном блочном массиве;
- каков механизм возникновения и проявления антропогенных землетрясений и с какого предельного уровня техногенных нагрузок меняется режим деформирования блочного массива.

Исследование связи между пространственной частотой возникновения землетрясений, темпами и объемами горных работ и геолого-структурными особенностями Хибинского массива является одной из наиболее актуальных задач. Ее решение напрямую зависит от точности оценки эпицентров событий и их характеристик.

До 1992 года координаты эпицентров землетрясений и их характеристики рассчитывались по данным сейсмических станций «Апатиты» ($67,57^{\circ}$ N; $33,41^{\circ}$ E), «Полярные Зори» ($67,37^{\circ}$ N; $32,53^{\circ}$ E), «Полярный Круг» ($66,44^{\circ}$ N; $32,75^{\circ}$ E) и «Кемь» ($64,95^{\circ}$; $34,64^{\circ}$ E). В расчетах использовалась финская модель среды. Все сейсмические станции находились на значительном удалении от массива, за исключением станции «Апатиты». При таком расположении точек наблюдения ошибка в определении координат составляла в среднем 3-5 км.

В 1992 году на сейсмостанции «Апатиты» была установлена современная цифровая система сбора сейсмических данных и широкополосная трехкомпонентная станция. В это же время на расстоянии около 18 км от сейсмостанции была развернута сейсмическая группа датчиков с трехкомпонентной станцией в центре группы (норвежская система «Aggøy»), сейсмическая фазированная решетка ($67,61^{\circ}$ N; $32,99^{\circ}$ E). Новая аппаратура существенно повысила точность измерения времен первых вступлений объемных волн и позволила выявить систематическую ошибку локации эпицентров, наиболее вероятным источником которой являлась неточность используемой модели среды применительно к локальным трассам распространения сейсмических волн в районе Хибинского массива.

Использование сейсмических данных для детального исследования динамики тектонических процессов, получения информации о характере и динамике техногенных деформаций невозможно без ясного понимания процессов распространения объемных и поверхностных волн от источника к точке наблюдения. Таким образом, возникла необходимость уточнения скоростной модели среды и расчета годографа для района, что позволит повысить точность локации эпицентров и максимально удовлетворить кинематической картине сейсмических сигналов, наблюдавшихся на ближайших к массиву сейсмических станциях.

Уточнение скоростной модели среды в пределах Хибинского массива производилось на основе регистрации промышленных взрывов на подземных рудниках. Координаты взрывов были известны, а величина зарядов составляла 100-200 т.

Результаты измерения времен первых вступлений объемных волн явились основой для расчета параметров новой модели. Уточнение модели скоростной среды в районе позволило зна-

чительно повысить точность локации эпицентров землетрясений в пределах Хибинского массива, что является весьма важным при исследовании сейсмичности в иерархически блочном массиве. По крайней мере, ошибка в точности локации эпицентров стала значительно меньше средних размеров геодинамических блоков, в результате чего появилась возможность выявления активизированных блоков и разломов. Подробно эта методика изложена в работе [101].

3.1. ДИНАМИКА СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В БЛОЧНОМ МАССИВЕ И ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Многочисленные наблюдения свидетельствуют о том, что процесс сейсмического деформирования невозможно рассматривать без учета структурных свойств среды, которые обусловлены неоднородностями различного уровня и происхождения. Неравномерность распределения сейсмичности связана с дискретным строением земной коры, которое сохраняется в течение весьма длительного времени. Неразрывная связь сейсмичности с тектоническими нарушениями следует из того, что на участках не осложненных разрывными нарушениями землетрясения не отмечаются и подавляющая масса их происходит в тектонически активных районах.

Поэтому представляется весьма важным исследовать пространственную неоднородность сейсмического поля в связи с иерархически блочным строением массива пород, слагающих район, выявить влияние техногенных воздействий на изменение сейсмического режима деформирования в зависимости от уровня техногенных нагрузок и характера их воздействия.

В каталог землетрясений Хибинского массива включены все события, происходившие в его пределах с 1948 года. Но до начала работы сейсмической станции «Апатиты» (1956 г.) - первой на Колымском полуострове, сведения о землетрясениях носили отрывочный характер и данные о них собирались по показаниям очевидцев.

Усовершенствование применяемой аппаратуры и оптимальное размещение станций в последние годы резко повысило чувствительность и точность локализации очагов землетрясений. Появилась возможность точной привязки эпицентров к геолого-структурным неоднородностям различного масштабного уровня и определения их глубины.

До 80-х годов землетрясения в пределах Хибинского массива отмечались редко, а к концу их количество возросло до 10-16 землетрясений в год. Зависимость между объемами добычи (кривая 1) и выделившейся сейсмической энергией (кривая 2) показана на рис. 32. Сейсмическая энергия рассчитывалась по формуле, приведенной в работе [102].

$$\log E = 12,30 + 1,27 \cdot M_L$$

где E - сейсмическая энергия землетрясения в эргах,
 M_L - магнитуда землетрясения.

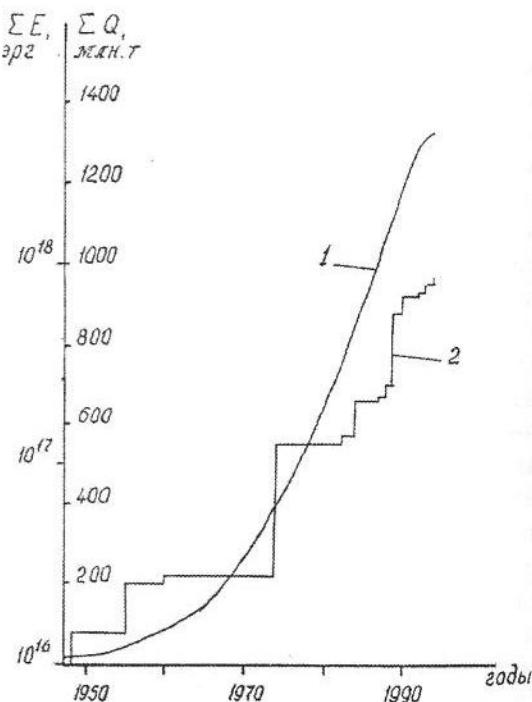


Рис. 32. Рост сейсмичности в Хибинах (2 – кривая Беньофа) в зависимости от объемов очистной выемки (кривая 1) во времени.

Как видно из рисунка, существует некоторая зависимость роста сейсмичности от количества извлеченной руды. Ведение горных работ в высоконапряженных массивах нарушает естественное устойчивое состояние, изменяет режимы деформации и активизирует геологические процессы развития земной коры. При этом большие по объему работы оказывают и более сильное воздействие. Выемку горной массы, образование больших отвалов и хвостохранилищ по своему воздействию можно сравнить с влиянием водохранилищ. Разница заключается лишь в том, что при извлечении полезного ископаемого гравитационная составляющая поля напряжений уменьшается, а при заполнении водохранилищ и создании отвалов и хвостохранилищ увеличивается, что приводит к изменению соотношения главных напряжений.

Например, сейсмологические исследования в районе Ингуринской ГЭС показали, что наведенная сейсмичность начинает проявляться, как правило, когда объем заполняемого водохранилища достигает 2 км^3 (2 млрд. т) при площади $10-20 \text{ км}^2$. Это соответствует увеличению гравитационных сил на 1-2 МПа.

На Хибинских рудниках с начала эксплуатации добыто более 1,3 млрд. т руды, а с учетом вскрышных работ извлечено более 3 млрд. т горной массы при площади очистной выемки около 12 км^2 , что соответствует уменьшению литостатических напряжений на 3 МПа, а на отдельных участках шахтного поля до 9-12 МПа. К началу 90-х годов темпы выемки горной массы приближались к 100 млн. т в год.

Извлечение горной массы по рудникам и понижение рельефа за счет очистных работ можно видеть на рис.33.

Наиболее интенсивное извлечение запасов руды началось в середине 60-х годов, с вводом в эксплуатацию Юкспорского, Расвумчоррского и Центрального рудников, однако в этот период какого-либо заметного увеличения сейсмичности не наблюдалось. Но, именно с этого времени, в подземных выработках действующих рудников горное давление стало проявляться в динамических формах в виде шелушения и стреляния пород, динамического заколообразования, толчков, микроударов и горных ударов. Это свидетельствует о перераспределении напряжений в массиве в ближней зоне от очистных работ [103,104].

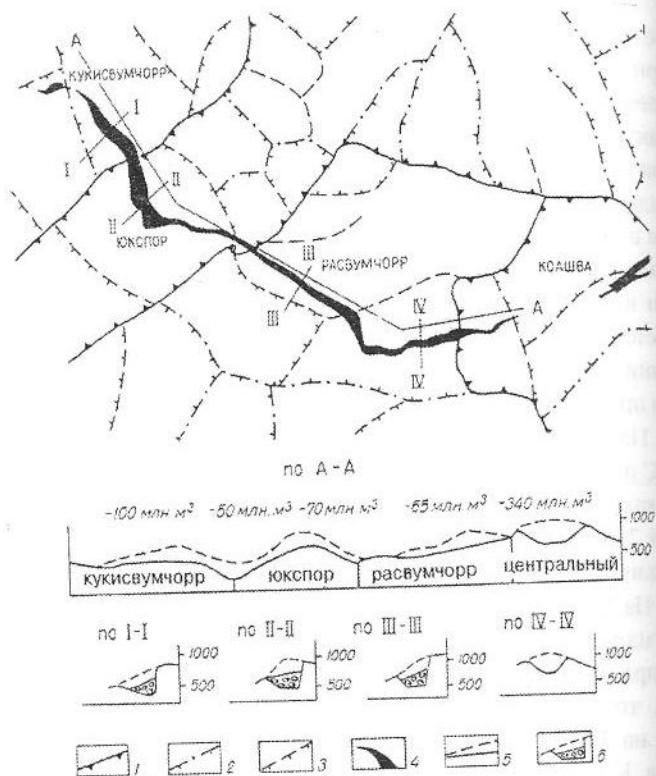


Рис. 33. Объемы извлечения горной массы по рудникам и понижение рельефа за счет очистной выемки.

1 – разломы второго ранга; 2 – разломы третьего ранга; 3 – разломы четвертого ранга; 4 – апатито-нефелиновые руды; 5 – современный рельеф поверхности (сплошная линия) и до начала очистных работ (пунктир); 6 – обрушенные породы висячего бока.

К началу 80-х годов интенсивность проявления горного давления резко возрастает, кроме собственно горных ударов отмечаются и горнотектонические удары, причиной которых являются внезапные подвижки и проскальзывания геодинамических блоков по тектоническим нарушениям под влиянием полей напряжений.

Такие явления сопровождаются сильными звуковыми и сейсмическими эффектами и по воздействию соответствуют слабым зем-

летрясениям. Так, например, 8 января, 18 августа, 29 сентября 1986 года горные удары вызвали сейсмические сотрясения в горных выработках и на промплощадке рудников интенсивностью 3-4 балла. По данным сейсмостанции «Апатиты» их магнитуды составили 1,5, 3,5, 3,2 соответственно. Глубина очагов оценивается до 5 км.

В силу особенностей системы разработки, применяемой на апатитовых рудниках, массовые взрывы с зарядом величиной 100-200 т для отбойки руды являются обычным технологическим процессом. Естественно, что они создают значительный сейсмический эффект и их влияние оказывается на состоянии горных выработок. Снижение негативного сейсмического воздействия массовых взрывов на горные выработки в общем технологически решено. Однако, в последние годы, начиная с 80-х, сильные сейсмические события явно не взрывного характера отмечаются спустя малое время после массового взрыва, или происходят в момент его. Так, 29 августа 1982 года после взрыва на Юксорском руднике и в момент взрыва в Саамском карьере, произошло землетрясение, которое ощущалось в пос. Кукисвумчорр и г. Кировске интенсивностью 4-5 баллов. Такие события надежно регистрируются и идентифицируются сейсмическими станциями.

Данные инструментальных наблюдений за поведением массива при воздействии массовых взрывов показывают, что тектонически нарушенный массив при сейсмическом воздействии взрыва испытывает значительные смещения. Так в работе [105] приведены данные о смещениях по разлому 5 ранга под воздействием массового взрыва на Кировском руднике 5.12. 1993 года. Вес заряда составлял 255 т.

Взрыв производился в 16 очередей с задержкой по 23 мс, то есть общая длительность взрыва составила примерно 0,35 сек. Относительное движение берегов разлома имело сложный поступательно-колебательный характер. Периоды таких колебаний различались на порядки и росли с течением времени, что свидетельствует о вовлечении в релаксационные процессы все более крупных структурных элементов массива. Максимум смещения составил 3 мм через 6 минут после взрыва.

Как показано в работе [105], в результате крупномасштабных горных работ сдвиговые напряжения, концентрирующиеся на разломе, могут достигнуть критических величин. Кроме того,

при взрывной отбойке руды происходит перераспределение напряжений в значительной области массива и сочетание этих двух факторов может привести к нарушению его равновесия.

Анализ проявления землетрясений во времени в связи с развитием горных работ на апатитовых рудниках Хибин показал, что существенный рост сейсмичности отмечается с 80-х годов, при достижении суммарных объемов добычи с начала работ определенных пределов. Это иллюстрирует график, приведенный на рис. 32 на котором выделившаяся сейсмическая энергия суммирована и сопоставлена с объемами руды, извлеченной с начала работ. Из рисунка видно, что уровень сейсмичности стал резко повышаться, когда суммарное извлечение запасов руды превысило 100 млн. т, что с учетом вскрышных работ составляет около 200 млн. т горной массы. Однако в этот период времени происходили редкие землетрясения, магнитуда которых была $M > 3$. Некоторая стабилизация сейсмического режима произошла при достижении объемов добытой руды 400 млн. т, и дальнейший рост сейсмичности отмечается с начала 80-х годов, когда было извлечено более 600 млн. т руды.

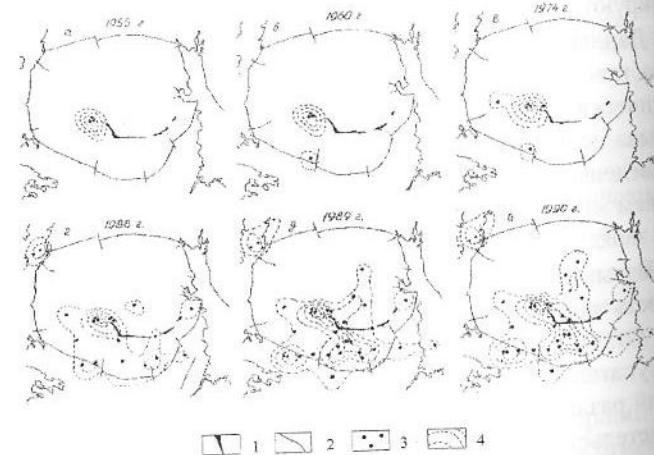


Рис. 34. Распределение землетрясений в Хибинах на разных этапах отработки месторождений.
1 – апатито-нефелиновые руды; 2 – границы Хибинского массива и разломы; 3 – эпицентры землетрясений с магнитудой больше двух; 4 – изолинии плотности землетрясений.

С этого периода количество землетрясений резко возросло и, несмотря на снижение объемов производства в начале 90-х годов, какого-либо уменьшения сейсмичности не наблюдалось. Видимо, это и является тем пределом техногенных нагрузок в Хибинах, при котором начинает проявляться техногенная сейсмичность, обусловленная влиянием горных работ, уровень которых достиг тех пределов, при которых нарушается естественное квазивесенное состояние массива. В результате активизировался ход естественных процессов развития земной коры в районе.

Отмечается также и закономерность распределения эпицентров землетрясений. На рисунке 34 показано положение эпицентров землетрясений, магнитуда которых $M > 2$, на различных этапах отработки месторождений. Здесь же изолиниями изображено распределение плотности землетрясений. Из рисунка видно, что с увеличением числа землетрясений их эпицентры, захватывая все большие территории, группируются в районе ведения горных работ и максимальное их количество на единицу площади отмечается вблизи Кировского, Юкспорского и Центрального рудников. Это объясняется тем, что основные объемы горной массы извлечены именно здесь, в результате чего прилегающий массив в наибольшей степени подвергся техногенному воздействию. Также обращает на себя внимание скопление эпицентров землетрясений у южной границы Хибинского массива, в районе расположения хвостохранилищ обогатительных фабрик и ГРЭС, складов руды, промышленного и гражданского строительства, где техногенные нагрузки также достаточно велики.

Для установления закономерностей распределения землетрясений в пространстве построены карты эпицентров. При этом по интенсивности проявления землетрясения разделены на три группы:

- землетрясения с магнитудой $M > 2$;
- землетрясения с магнитудой $1,5 < M < 2$;
- землетрясения с магнитудой $M < 1,5$;

Местоположение эпицентров землетрясений с магнитудой больше двух показано на рисунке 35а. Очевидно, что сейсмически активными являются Кукисумчоррский, Юкспорский, Расвумчоррский и, в меньшей степени, Коашвинский блоки второго ранга, в пределах которых расположены одноименные эксплуатируемые месторождения.

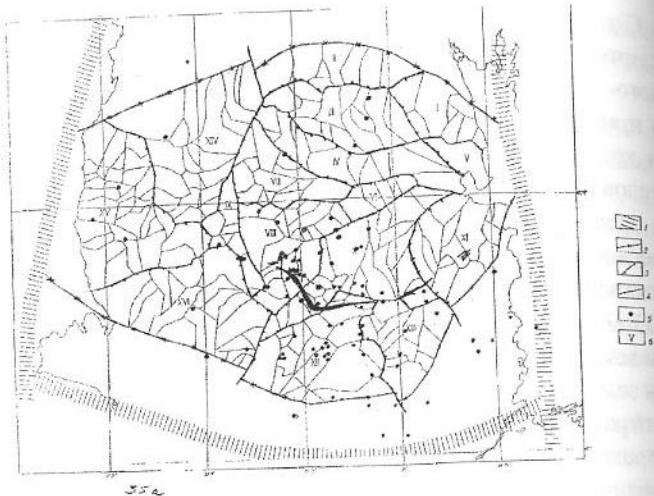


Рис. 35а. Распределение эпицентров землетрясений с магнитудой (M) больше двух за период с 1948 по 1994 годы.

1 – региональные разломы; 2 – разломы, обрамляющие Хибины; 3 – разломы второго ранга; 4 – разломы третьего и четвертого рангов; 5 – эпицентры землетрясений; 6 – номера геодинамических блоков второго ранга.

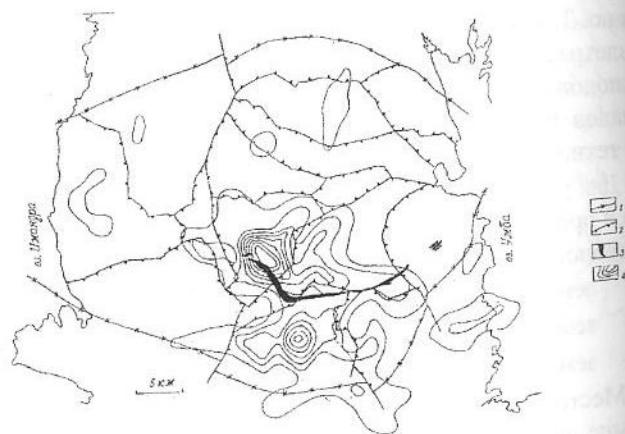


Рис. 35б. То же в изолиниях плотности землетрясений ($\text{шт}/\text{км}^2$). Показаны изолинии со значениями 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

1 – разломы, обрамляющие Хибины; 2 – разломы второго ранга; 3 – апатито-нефелиновые месторождения; 4 – изолинии плотности землетрясений.

Особенно наглядно это иллюстрируется рисунком 35б, на котором сейсмоактивность Хибинского массива представлена в виде изолиний плотности землетрясений. На рисунке отчетливо выделяются два максимума. Один из них расположен в пределах Кукисумчоррского блока и тяготеет к висячему боку рудного тела, а другой находится практически в центре Расвучоррского блока. Пространственно этот максимум тяготеет к лежачему боку рудного тела, горам Ловчорр и Айкуайвенчорр, у подножья которой расположен г. Кировск.

Наиболее вероятным объяснением этого факта является различие в условиях техногенного воздействия на массив. В Кукисумчоррском и Юкспорском блоках извлечение руды осуществляется подземным способом, путем подработки и последующего самообрушения покрывающих пород. В Расвумчоррском же блоке добыча руды производится преимущественно открытым способом, при котором первоначально на большой площади осуществляется вскрытие рудного тела, то есть извлекается налегающая толща пород, а затем извлекается и полезное ископаемое, в результате чего происходит постепенная релаксация напряжений в массиве на большой площади. Кроме того, на формирование этого максимума, видимо, оказывает влияние и нагрузка от г. Кировска.

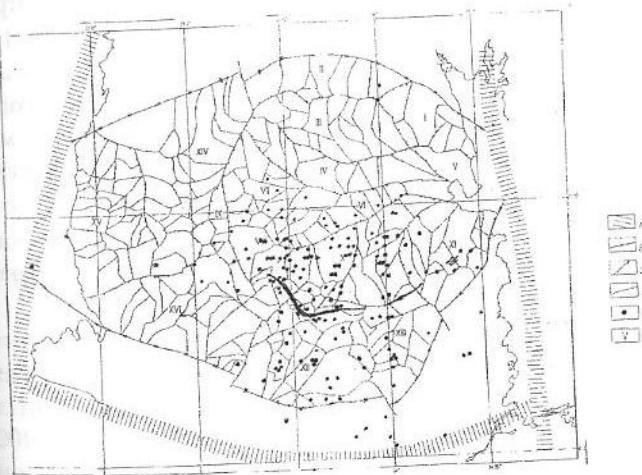


Рис. 36а. Распределение эпицентров землетрясений $1,5 < M < 2$ за период 1948 -1994 г.г. (Условные обозначения на рис. 35а)

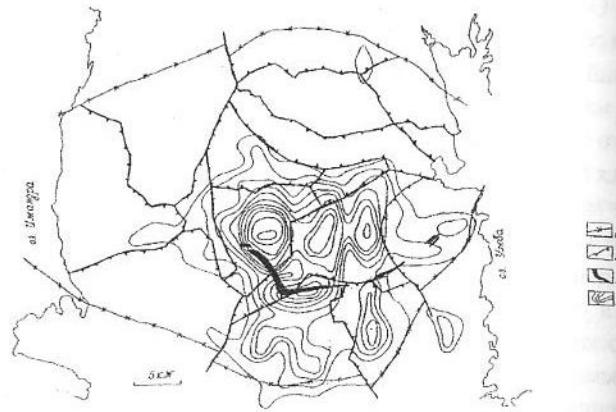


Рис. 36б. То же в изолиниях плотности землетрясений ($\text{шт}/\text{км}^2$)
Показаны изолинии со значениями 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16.
(Условные обозначения на рис. 35б).

Несколько землетрясений произошло на удалении от района ведения горных работ на расстояние 15-20 км. Площадь сейсмоактивных блоков составляет 296,2 km^2 . Сейсмоактивными блоками считались блоки 4 ранга, в которых произошли землетрясения, а также смежные блоки, на границе которых расположены эпицентры.

Распределение землетрясений, магнитуда которых $1,5 < M < 2$ показано на рис. 36а, а плотность землетрясений в изолиниях изображена на рис. 36б. Количество землетрясений такой интенсивности в 1,8 раза превышает число землетрясений с магнитудой $M > 2$. Отмечается несколько максимумов, группирующихся преимущественно в районе ведения горных работ и вблизи него.

Площадь сейсмоактивных блоков, в которых произошли землетрясения такой интенсивности значительно больше, чем у предыдущей группы и составляет 434,1 km^2 .

Распределение эпицентров землетрясений третьей группы, магнитуда которых менее 1,5 представлено на рис. 37а, а их плотность, то есть количество на единицу площади на рис. 37б. Площадь блоков, в которых произошли землетрясения составляет 400,3 km^2 . Максимальное количество землетрясений этой группы произошло в Кукисумчоррском блоке и в примыкающей к нему части Южноспорского блока. В целом эпицентры землетрясений этой группы тяготеют непосредственно к району ведения горных работ.

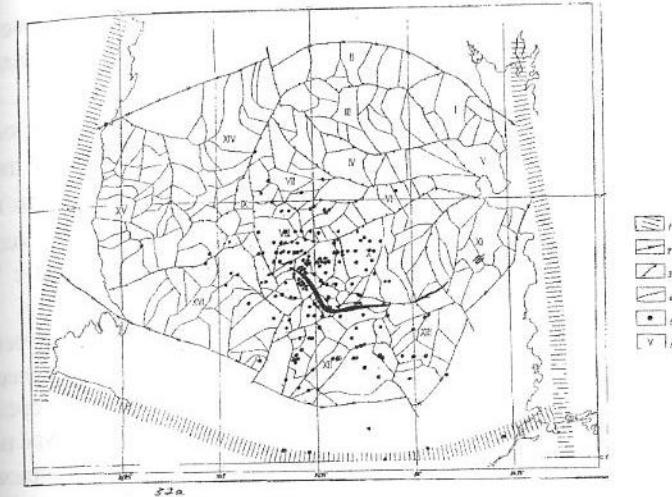


Рис. 37а. Распределение эпицентров землетрясений с $M < 1,5$
за период 1948-1994 г.г.
(Условные обозначения на рис. 35а)..

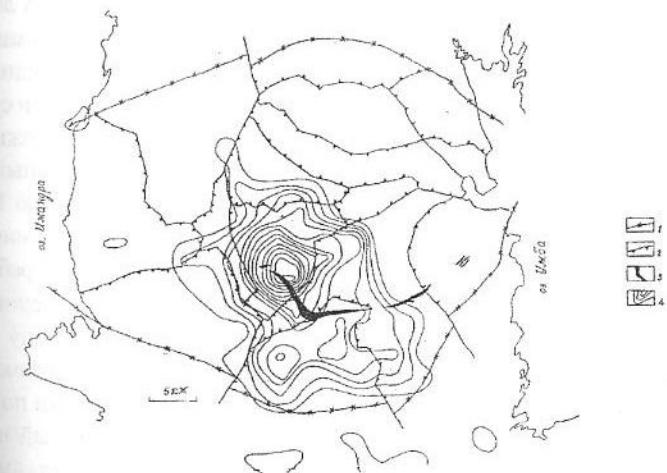


Рис. 37б. То же в изолиниях плотности землетрясений ($\text{шт}/\text{км}^2$).
Показаны изолинии со значениями 1,2,3,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,24.
(Условные обозначения на рис. 35б)..

Энергия землетрясений каждой группы, выделившаяся с единицы площади за этот период времени, распределилась следующим образом:

- для землетрясений с магнитудой $M > 2 - 2,97 \cdot 10^8$ дж/км²
- для землетрясений с магнитудой $1,5 < M < 2 - 1,04 \cdot 10^7$ дж/км²
- для землетрясений с магнитудой $M < 1,5 - 4,07 \cdot 10^6$ дж/км²

Суммарная сейсмическая энергия, выделившаяся с одного квадратного километра сейсмогенных блоков, за период с 1948 по 1994 год включительно, составляет $2,17 \cdot 10^8$ дж/км²

С целью выявления закономерности выделения сейсмической энергии во времени проведен анализ проявления землетрясений по годам. Для этого строились графики распределения средней энергии по годам и графики распределения средней удельной энергии, то есть выделившейся сейсмической энергии, приходящейся на тонну добытой руды. Графики показаны на рисунках 38а, б. При построении графика распределения средней энергии по годам полагалось, что за период между землетрясениями энергия накапливалась равномерно. Поэтому и выделившаяся сейсмическая энергия распределялась по годам также в равных долях.

Рассматривая график распределения средней сейсмической энергии, выделившейся в различные периоды времени, видна явная тенденция к ее росту. Сопоставляя с графиком зависимости суммарной сейсмической энергии от объемов добытой руды, можно считать, что естественный средний максимальный наблюденный энергетический фон сейсмичности в Хибинах составляет около 10^8 Дж/год. Из этого следует, что всякое превышение фона сейсмичности можно связывать с влиянием широкомасштабных горных работ.

Зная объемы извлечения полезного ископаемого можно оценить и сейсмическую энергию, приходящуюся на одну тонну руды, то есть - удельную сейсмическую энергию. На графике (рис. 38б) показано распределение средней удельной энергии по годам и ее изменение с начала работ. Видно, что в начальный период эксплуатации месторождений удельная энергия была высокой и постепенно снижалась с увеличением объемов производства. Рост ее начался вновь в восьмидесятых годах, в период повышения сейсмичности, когда суммарно извлеченные запасы превысили 600 млн. т, что еще раз наглядно подтверждает представление об активизации сейсмического процесса крупномасштабными

горными работами. Это подтверждает и аппроксимирующая прямая, свидетельствующая о смене сейсмического режима.

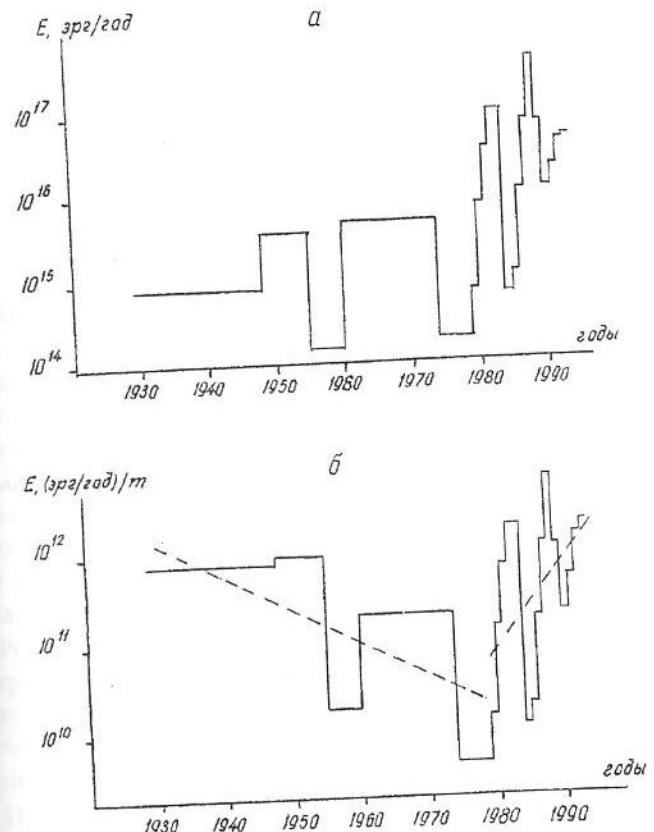


Рис. 38. Распределение средней (а) и удельной (б) сейсмической энергии по годам.
(Пунктирной линией показана аппроксимирующая прямая).

Для проверки этой гипотезы проведен количественный анализ полученных данных методами математической статистики.

Исследование влияния уровня добычи руды на процесс генерации сейсмической энергии (рис. 39а) показали, что на всем рассматриваемом временном интервале уровень извлечения руды непрерывно увеличивался со скоростью около 1560 тыс. т в год и только с 1991 года ее резкий спад со скоростью примерно 8300 тыс. т в год.

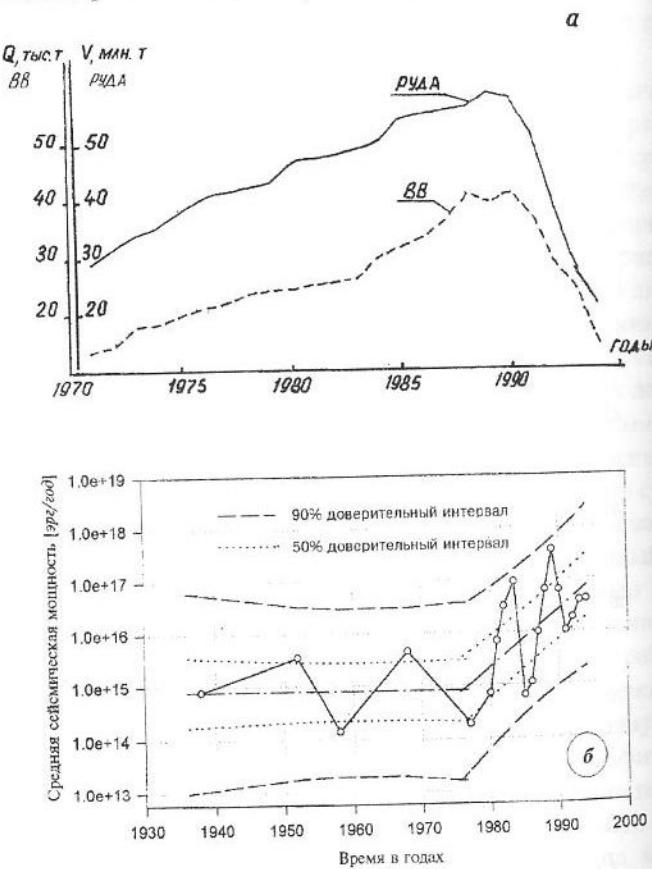


Рис. 39а, б. График изменения объемов годовой добычи руды и расхода ВВ (а) и изменение во времени годовой сейсмической энергии, выделяемой при землетрясениях (б).

Пропорционально изменяется и расход взрывчатых материалов, т.е. с начала горных работ и до 1990 года Хибинский массив находился под непрерывно нараставшим техногенным воздействием, обусловленным широкомасштабными горными работами, а после этого уровень инженерного воздействия стал резко снижаться. Однако из рисунка 38 следует, что до 1980 года возрастание техногенных нагрузок не приводило к значительному увеличению мощности выделяемой сейсмической энергии. Статистические тесты свидетельствуют и об отсутствии связи между рассматриваемыми величинами в период 1980-94 годов. Снижение объемов производства после 1990 года не повлекло за собой снижения выделяемой сейсмической энергии, а отмечалось её нарастание.

Известны публикации о засорении местных каталогов землетрясений взрывами и, в качестве примера, можно привести Приэльбрусье, где в каталоге землетрясений до 90% сейсмических событий от общего числа является взрывами, которые по записям сейсмограмм отличить от землетрясений весьма затруднительно. Поэтому, проводилась отбраковка сейсмических событий на сейсмограммах вызванных взрывами. О каждом взрыве, произошедшем на рудниках Хибин известно время, место и количество взрывчатых материалов. Все эти сейсмические события из каталогов землетрясений исключены.

Результаты показали, что смена сейсмического региона в рассматриваемом районе прошла в период между 1977-1980 годами. В дальнейшем, количество выделившейся сейсмической энергии с вероятностью 50% возрастает на 18-32% в год. График изменения средней сейсмической энергии представлен на рисунке 39б.

Проведенные экспериментальные исследования зависимости выделяемой Хибинским массивом сейсмической энергии от времени и изучение связи между количеством добываемой руды, количеством взорванного ВВ и сейсмической энергией показали, что Хибинский массив ведет себя как сложная нелинейная система. Обнаружено, что после уменьшения техногенных нагрузок на массив, то есть резкого снижения годовой производительности рудников, не происходит одновременного уменьшения среднегодовой энергии сейсмических событий, а также отсутствует корреляция между среднегодовой массой добываемой руды, количеством ВВ и выделяемой сейсмической энергией.

Видимо наведенная сейсмичность проявилась в результате кумулятивного, то есть накопленного техногенного воздействия, обусловленного перераспределением напряжений в геодинамических блоках, в которых осуществляется извлечение полезного ископаемого. Главенствующим фактором является изменение общего поля напряжений в приповерхностной части земной коры, произошедшее под влиянием именно очистной выемки и образования отвалов пустых пород вблизи ведения горных работ.

И, конечно же, этот вопрос требует дальнейших исследований хотя бы потому, что в отличие от районов водохранилищ, при широкомасштабных горных работах на приповерхностную часть земной коры действуют знакопеременные нагрузки (очистная выемка и образование отвалов и хвостохранилищ).

Проведенные исследования позволили установить:

- рост сейсмической активности в Хибинах обусловлен ведением широкомасштабной очистной выемки полезного ископаемого, под воздействием чего уменьшается гравитационная (литостатическая) составляющая исходного поля напряжений и меняется вид напряженно-деформированного состояния геодинамических блоков различного ранга. С развитием горных работ в процесс сейсмического деформирования вовлекается все большее количество блоков, общая площадь которых в десятки раз превышает площадь очистной выемки. При этом часть землетрясений провоцируется мощными технологическими взрывами, которые являются своеобразным триггерным механизмом;
- эпицентры землетрясений группируются непосредственно в районе ведения горных работ и в блоках 3 и 4 рангов, в которых расположены эксплуатируемые месторождения;
- несмотря на значительное снижение темпов и объемов горного производства на апатитовых рудниках в начале 90-х годов, какого-либо уменьшения сейсмичности не отмечается. Напротив, наряду с ростом общего числа землетрясений, их количество увеличивается и количества землетрясений, магнитуда которых $M > 2$.

3.2. ВЛИЯНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕХНОГЕННУЮ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Широкомасштабные горные работы приводят к росту сейсмичности, а эпицентры землетрясений группируются в тех геодинамических блоках, в которых извлечено максимальное количество горной массы. В результате интенсивной добычи меняется соотношение главных напряжений в нетронутом раньше массиве. В частности, уменьшается вертикальная компонента поля напряжений за счет разгрузки от всех извлеченных руд и пород, при практически неизменных тектонических напряжениях

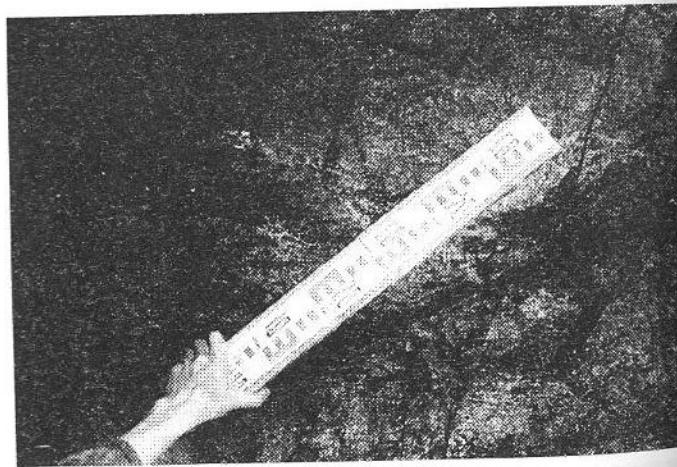
Сопоставление данных о количестве извлеченной руды и площади геодинамических блоков, подверженных проявлению сейсмичности, показало, что наряду с ростом сейсмичности и группировкой эпицентров землетрясений вблизи места ведения горных работ, изменение сейсмического режима происходит на постоянно увеличивающейся площади [107,108]. То есть с увеличением количества добываемой руды с начала работ в процесс сейсмического деформирования вовлекаются все более удаленные блоки.

Влияние очистной выемки на изменение режима деформации и сейсмичность рассмотрим на конкретном примере землетрясения, произошедшего 16 апреля 1989 года в районе действующего Кировского рудника. На руднике производился плановый массовый взрыв для отбойки руды (величина заряда составляла 200 т ВВ), вслед за которым в 10 час 35 мин (по данным сейсмостанции «Апатиты» через 300 миллисекунд после начала взрыва) произошло землетрясение, амплитуда которого составила по различным источникам $M = 4,2\text{--}4,5$.

Землетрясение было зарегистрировано более чем на 20 отечественных и зарубежных сейсмостанциях. Очаг землетрясения был непосредственно определен в пределах рудника, в процессе обследования горных выработок [79].

Установлено, что по разлому 5 ранга, представленному разгнейсованной жилой эгирина мощностью 15-25 см, произошла подвижка налегающего блока - надвиг. Простиране разлома северо-западное, падение на северо-восток под углом 30-35°. Породы вблизи нарушения слабо спреуптейнизированы, а по связанный с ним системе трещин развиты гидротермальные образования группы цеолитов.

Документация горных выработок и маркшейдерские измерения после землетрясения позволили установить, что по плоскости разрыва произошел надвиг, амплитуда которого составляла на гор. +322 м 8-9 см, на гор. +252 м 6-7 см и на гор. +172 м 2-3 см. На берегах образовавшейся трещины четко прослеживаются борозды трения, позволяющие судить о направлении перемещения. В подземных горных выработках, пересекаемых нарушением, произошли выбросы объемом до 1-2 м³, разрушено бетонное крепление, деформированы кран-балки и рельсовые пути, а также деформированы проводники и направляющие главного ствола и лифтового восстающего. На промплощадке рудника была разрушена кирпичная труба котельной, фундаменты административно-бытового комбината и здания главного ствола. В пос. Кукисвумчорр и г. Кировске отмечены также многочисленные повреждения. По шкале MSK-64 интенсивность землетрясения составляла непосредственно в руднике 8 баллов, в пос. Кукисвумчорр и г. Кировске 6 и 5 баллов соответственно. В г. Апатиты оно ощущалось как четырехбалльное. Характер разрушения при землетрясении представлен на рисунках 40, 41, 42.



*Рис. 40. Разлом пятого ранга, по которому произошло смещение при землетрясении 16.04.89 г.
Видна трещина, разорванная и смещенная на 9 см*

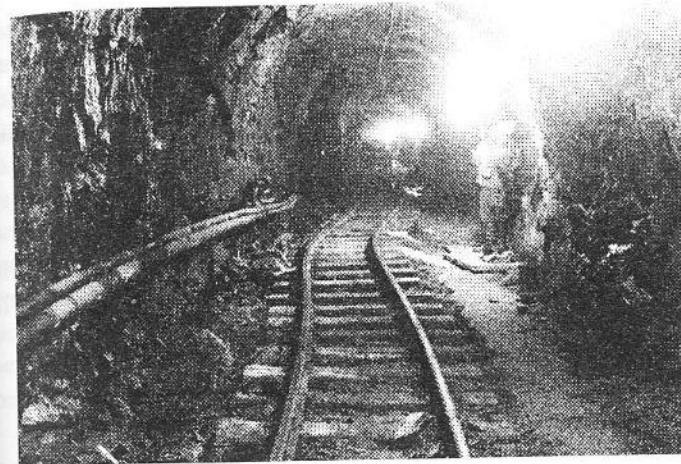


Рис. 41 Рельсовые пути, деформированные при землетрясении. Рельсы вместе со шпалами вырваны из подошвы и смещены на расстояние около 50 см.

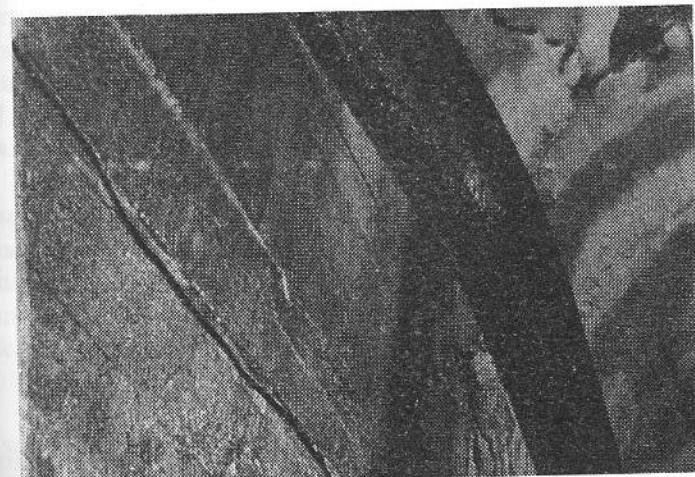


Рис. 42. Разрушения при землетрясении 16.04.89 г. в камере ремонта электровозов

В плане, по простианию нарушения, подвижка проявилась на участке протяженностью 1,1 км. На флангах этот участок ограничен почти вертикальными разрывами, представленными зонами широкийнизации. На глубину смещение по разлому прослежено от поверхности (абс. отм. +380 м) и в горных выработках на горизонтах

+322 м, +252 м, +172 м. План и разрез с указанием местоположения разломов и сместившегося блока показан на рис. 43. На разрезе видно, что сместившийся блок имеет клиновидную форму. Крутопадающий разлом, по которому произошел отрыв от массива и смещение прослежен в обнажениях на склоне горы Кукисумчорр.

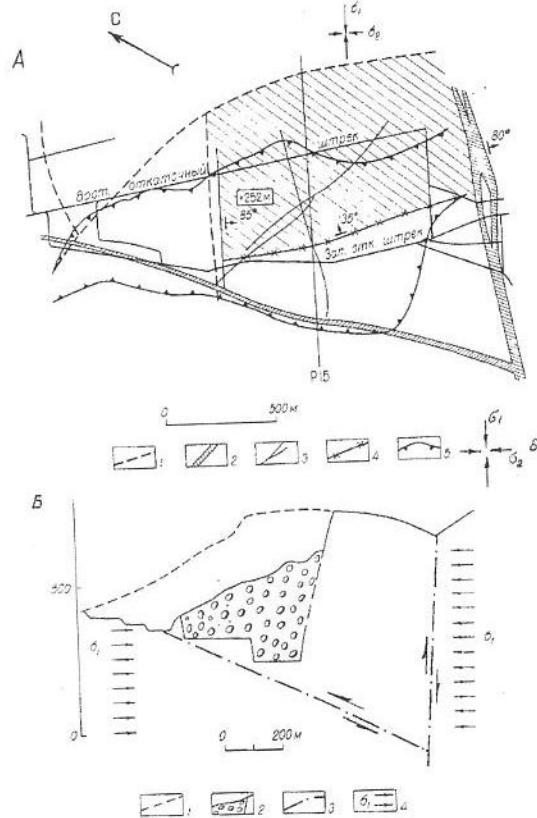


Рис. 43. Механизм очага землетрясения, произошедшего на Кировском руднике 16 апреля 1989 г.

А – план: 1 – местоположение разломов в рельефе; 2 – разломы второго ранга, задокументированные в подземных горных выработках; 3 – разломы пятого ранга; 4 – разлом, по которому произошел надвиг при землетрясении; 5 – граница бровки обрушения пород по поверхности; 6 – направление действия горизонтальных напряжений. Б – разрез по профилю 15: 1 – рельеф поверхности; 2 – рельеф поверхности и обрушенные породы на момент начала очистных работ; 3 – разломы пятого ранга, по которым произошло смещение; 4 – направление действия максимальных горизонтальных напряжений.

Описание предыстории землетрясения, горнотехнической и инженерно-геологической ситуации.

Местоположение разломов и элементы их залегания можно видеть на рисунке 43. Здесь же показано направление действия главных напряжений на данном участке массива. Величина главного горизонтального напряжения по данным метода разгрузки составляет 30-80 МПа, промежуточного 25-50 МПа. В процессе очистных работ из сместившегося блока извлечено около 25% от первоначального его объема, в результате чего рельеф поверхности понизился на 300-400 м. Это привело к уменьшению литостатической составляющей поля напряжений на 9-12 МПа при практически неизменных остальных его компонентах.

При проведении горных выработок, пересекающих разлом по которому произошел надвиг, на всех горизонтах отмечались аномально высокие сжимающие напряжения, что зафиксировано в материалах наблюдений службой прогноза и предотвращения горных ударов Кировского рудника. В выработках это проявлялось в виде динамических форм горного давления (щелушение, динамическое заколообразование, стреляние пород). Инструментально на таких участках, прилегающих к разлому, оценивалась I-II категории ударопасности и проведение выработок осуществлялось с применением противоударных мероприятий.

Наряду с разгнейованностью материала, выполняющего разлом, эти данные позволяют утверждать, что данный разлом является сам по себе активным, живущим и в процессе естественной эволюции массива подвижки по нему рано или поздно проявились бы. Горные работы лишь активизировали этот процесс, а массовый взрыв сработал как триггерный механизм.

Механизм очага землетрясения.

Детальное обследование подземного рудника и поверхности позволило выявить разломы, по которым произошла подвижка и разработать модель механизма очага землетрясения. В соответствии с чем были произведены расчеты напряженного состояния и перемещений в массиве в плоскости, соответствующей положению упомянутого разлома [78, 79]. Расчеты производились при наличии литостатических и тектонических напряжений для двух вариантов: ненарушенного массива (до начала горных работ) и реального его состояния на момент землетрясения с учетом по-

нижения уровня свободной поверхности и наличия в массиве обlastей, заполненных раздробленной породой. Естественное поле напряжений нетронутого массива может быть задано соотношениями [39]:

$$\delta_A = pg h, \quad \delta_A = \zeta pgh + T_0 + \nabla \delta_A h$$

где h - глубина, p - плотность массива пород, $\zeta = v/(1-v)$, v -коэффициент Пуассона, T_0 - модуль горизонтальных тектонических сил непосредственно вблизи дневной поверхности, на уровне местного базиса эрозии, $\Delta\delta_\phi$ - вертикальный градиент тектонических напряжений. В настоящее время данных для точного определения последнего параметра недостаточно, поэтому для рассматриваемых глубин тектоническая составляющая поля напряжений полагалась в расчете постоянной:

$$T = T_0 + \Delta\delta_A h = const$$

Расчеты дают возрастание сдвиговых напряжений τ на плоскости разлома во втором варианте по сравнению с первым. Для отметки +252 горизонта (средний из трех отрабатываемых) величина τ возрастает от 9 до 12 МПа для $T = 30$ МПа и от 18 до 20 МПа для $T = 50$ МПа (рис. 44), с соответствующим уменьшением величины сжимающих напряжений на площадках, перпендикулярных плоскости трещины, что соответствует критическим прочностным величинам.

Для двух вариантов вычислялись величины упругого смещения вдоль плоскости разлома $U_i^{(1)}$ и $U_i^{(2)}$, их разность для уровней упомянутых выше горизонтов составляет $\Delta U_i = 6-8$ см, что практически совпадает с измеренной величиной подвижки. На эту величину должны сместиться точки массива в плоскости разлома относительно неподвижной его части при изменении нагрузки в результате очистной выемки.

По известным из натурных измерений смещениям и расчетному напряженному состоянию нетрудно оценить величину работы сдвиговых напряжений при такой подвижке. Для $T = 30$ МПа работа $A = 0,5 * 10^{12}$ Дж, для $T = 50$ МПа $A = 10^{12}$ Дж

Величина A соответствует упругой энергии, высвобождающейся в массиве при подвижке по разлому, и по порядку величины совпадает с оценкой сейсмической энергии землетрясения $E_c \approx 10^{12}$ Дж.

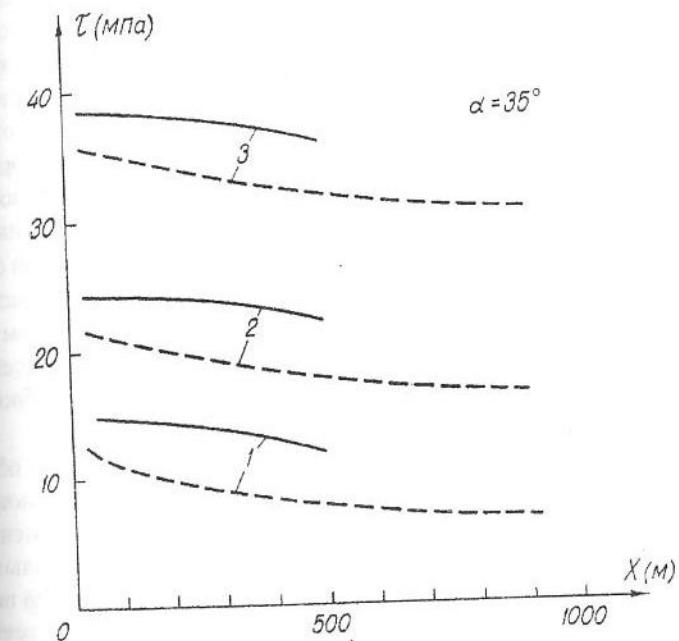


Рис. 44. Возрастание сдвиговых напряжений в плоскости разлома при: $T = 30$ МПа (1), $T = 50$ МПа (2), $T = 80$ МПа (3).

Для связи между объемом очага землетрясения V , как источника упругих колебаний и излучаемой энергией E_c обычно используют эмпирическую зависимость [85, 109]:

$$\lg E_c = \lg V + a$$

где величина a , равна 2,7, $V^{3/2}$, а S принимается равной площади проекции зоны афтершоков на поверхности Земли. В данном случае величина S может быть оценена как площадь самой трещины. Тогда по приведенной формуле получаем оценку сейсмической энергии $E \approx 0,5 * 10^{12}$ Дж.

Таким образом, изменение напряженного состояния в массиве в результате извлечения полезного ископаемого в больших объемах приводит к внезапным подвижкам отдельных блоков по их границам, что сопровождается техногенными землетрясениями. Подвижка какого-либо блока меняет характер его взаимодействия

с соседними блоками и может в свою очередь вывести какой-либо из них из равновесного состояния, поскольку изменится их геодинамический режим. Границы блоков в массиве могут быть не только явными трещинами и разломами, но и ослабленными зонами, которые не всегда визуально определяются. Но потеря устойчивости такой блочной системы может привести к образованию новых разрывов и блоков и их внезапным смещениям с выделением значительного количества сейсмической энергии.

На фоне дифференцированных вертикальных движений блоков в Хибинском массиве, в условиях преобладающих горизонтальных напряжений над вертикальными, при интенсивном извлечении запасов руды механизм техногенных землетрясений может носить характер взбросов, взбросо-надвигов или взбросов со сдвигами.

Вероятность землетрясений возрастает с увеличением объемов добытой руды в пределах одного геодинамического блока в силу того, что под воздействием горных работ вид напряженно-деформированного состояния меняется все в большей и большей степени за счет уменьшения гравитационной составляющей поля напряжений.

3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ БЛОЧНОГО МАССИВА НА ТЕХНОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ МАЛЫХ ЭНЕРГИЙ

В связи с осложнением горно-геологических условий эксплуатации апатито-нефелиновых месторождений Хибин и возникновением проблемы борьбы с горными ударами, была разработана и введена в действие автоматизированная система контроля за сейсмической активностью массива (ACK СМ) с целью прогноза горных ударов.

Развернута она на Кировском руднике и контролирует состояние массива в пределах шахтного поля. С помощью системы осуществляется локация и определяются параметры сейсмических событий, энергетический уровень которых составляет n^*10^2 - n^*10^5 Дж. Погрешность в определении их координат составляет (25 - 75) м, в зависимости от местоположения толчков и конфигурации сети сейсмоприемников.

С помощью системы в реальном времени осуществляются процессы сбора, обработки, накопления и отображения информации. Некоторые методические подходы к обработке получаемых материалов изложены в работах [110,111].

Анализ данных осуществлялся в нескольких направлениях, при этом решались следующие задачи:

- на основе анализа сейсмических событий малых энергий исследовалась динамика сейсмичности с учетом блочного строения и активности разломов;
- исследовалась реакция блочного массива на мощные технологические взрывы;
- исследовалось поведение иерархически блочного массива в период подготовки землетрясения и после него;
- рассматривалась возможность прогноза сильных сейсмических явлений на основе анализа сейсмических событий малых энергий.

3.4. РЕАКЦИЯ БЛОЧНОГО МАССИВА НА МОЩНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВЗРЫВЫ

Результатами функционирования системы является получение энергетических, спектрально-временных и пространственных характеристик источников сейсмических сигналов, а также обобщенный анализ сейсмичности в контролируемой зоне в виде карт сейсмоактивности и графиков повторяемости [112].

На рисунке 45 изображена карта одного из наиболее неблагоприятных по горнотехническим условиям района Кировского рудника, включающего в себя блок-целик, осложненный тектоническими нарушениями.

После производства массовых взрывов для отбойки руды (обычная величина зарядов ВВ составляет 100-200 т) на подземных апатитовых рудниках наблюдается большое количество разрушений в горных выработках в виде микроударов, горных ударов, разрушения крепления и т.п. Поэтому в качестве одного из критериев оценки напряженно-деформированного состояния массива исследовался сейсмический отклик контролируемого участка на массовый взрыв. Рассмотрим полученные при этом результаты.

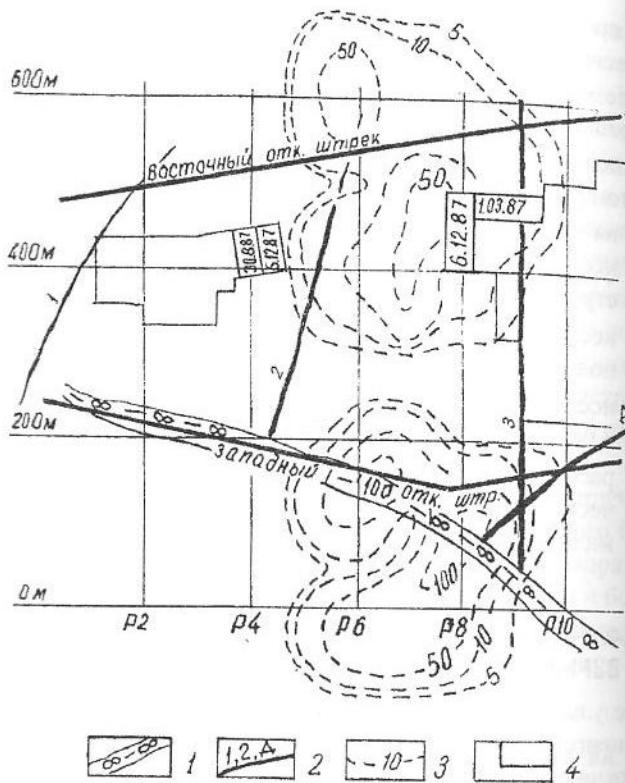


Рис. 45. Пространственное распределение плотности сейсмической энергии в районе производства массовых взрывов на гор. +252 м Кировского рудника.

1 – разлом Врткеуай; 2 – поперечные разломы пятого ранга 1, 2, 3 и диагональный разлом; 3 – изолинии плотности сейсмической энергии ($\text{Дж}/\text{м}^2$); 4 – контуры очистной выемки по состоянию на 06.12.87 г.

1 марта 1987 года взрывалась секция блока 7-9, объемом 180 тыс. м^3 горной массы (около 500 тыс. т руды). В течение суток после проведенного взрыва зарегистрировано 15 сейсмических событий с энергией до 10^6 Дж , большинство из которых приурочено к зонам тектонических нарушений. В зоне влияния опорного давления, в районе отбитой секции, повышения сейсмичности не обнаружено. Снижение сейсмичности до уровня фоновых значений

произошло в течение 5 часов (Рис. 46а). Перед массовым взрывом уровень сейсмического фона характеризовался 4-7 сейсмическими событиями в сутки с энергией до 10^3 Дж .

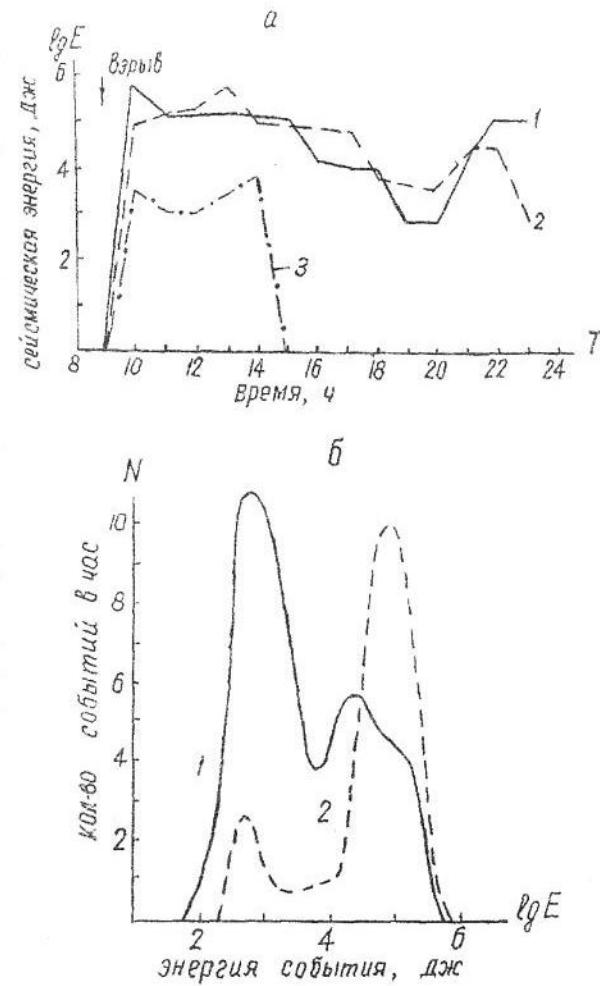


Рис. 46. Сейсмическая активность за 15 часов после массового взрыва 06.12.87 г.

а – распределение сейсмических событий во времени;
 б – распределение количества событий по энергии;
 1 – западный район; 2 – восточный район; 3 – блок-целик.

Массовый взрыв, произведенный 30 августа 1987 года, несмотря на его значительную мощность, также не привел к существенному росту сейсмической активности в пределах этого района. Местоположение массовых взрывов показано на рисунке 45. 6 декабря 1987 года был произведен массовый взрыв с одновременной отбойкой сразу двух секций, одна из которых расположена на северном, а другая - на южном флангах вырезной ленты блока-целика (Рис. 45). На юге взрывалась секция объемом 220 тыс. м³ горной массы, а на севере около 70 тыс. м³, что привело к толчкообразному перераспределению напряжений, обусловленному уменьшением площади вырезной ленты блока-целика и образованием зависающих консолей со стороны висячего бока рудного тела. После массового взрыва зарегистрировано резкое повышение сейсмической активности в блоке-целике, в районе зоны опорного давления от очистных работ. За сутки произошло 124 сейсмических события, причем энергия 14 из них превышала 10⁵ Дж.

Кроме того, произошла активизация и другого района, расположенного к западу от взорванных секций и удаленному от места взрыва на 400 м. Этот район характеризуется наличием нескольких пересекающихся разломов 5 ранга и разлома 4 ранга, представленных зонами ширеуптейнизации и дробления мощностью от 2-3 до 10-20 м. Зоны сейсмической активности показаны на рисунке 45 в виде изолиний плотности сейсмической энергии в Дж/м². Максимум сейсмической активности в восточном районе наступил через три часа после взрыва, в то время как в западном районе максимальная энергия выделилась уже в первый час после него. За сутки сейсмоактивность уменьшилась, несмотря на то, что в 22 часа имел место ее второй максимум (Рис. 46). Затухание наблюдаемых процессов и снижение сейсмической активности до уровня фона в обоих районах произошло через 7 суток, причем носило периодический характер (Рис. 47). События с энергией свыше 10⁵ Дж прекратились на четвертые сутки, а события более 10⁴ Дж только на шестые сутки. За весь период сейсмической активизации события с максимальной энергией (10⁵ Дж и выше) происходили в западном районе, и в среднем их энергия была на порядок выше событий, отмеченных в восточном районе.

Кроме того, сейсмическая активность западного и восточного районов отличается по времени, крутизне фронта первого вступления и другими характеристикам (Рис. 46б).

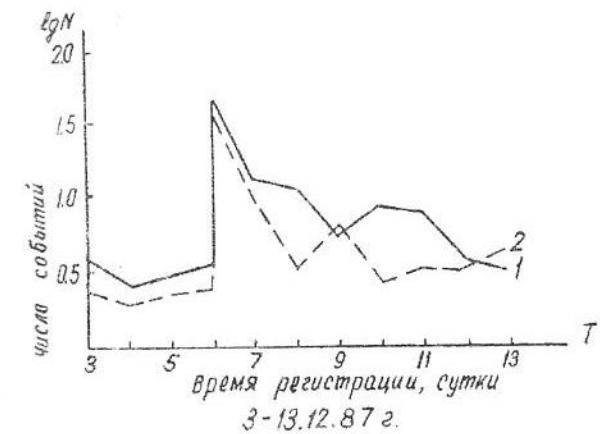


Рис. 47. Динамика изменения сейсмоактивности после массового взрыва 06.12.87 г.

1 – западный район; 2 – восточный район.

Таким образом, при производстве технологических массовых взрывов большой мощности в высоконапряженных блочных массивах отмечаются следующие особенности их воздействия на среду:

- активизация сейсмических процессов после производства массовых взрывов отмечается в наиболее напряженных участках массива. Такими являются зона опорного горного давления от очистных работ в висячем боку рудного тела и участки массива, прилегающие к разрывным тектоническим нарушениям и находящиеся в зоне их влияния;
- сейсмические события, происходящие на таких участках, различаются по энергетическим характеристикам. Толчки, приуроченные к зонам разломов, имеют энергию в среднем на порядок выше, чем сейсмические события в зоне опорного горного давления и достигают значений 10⁵-10⁶ Дж;
- различия в протекании процессов сейсмической активизации наблюдаются также и по времени ее начала. Активизация участков вблизи тектонических нарушений начинается практически сразу после проведения мощного взрыва, что обусловлено наличием высоких тектонических напряжений вблизи зон разломов и динамическим воздействием взрыва

на них. В то время, как в зонах опорного горного давления от очистных работ сейсмические события начинаются спустя некоторое время после массового взрыва и достигают пика своей активности через несколько часов после него (обычно 2-4 часа). По всей вероятности, это вызвано динамикой процесса перераспределения статических напряжений за счет образования консольных зависаний в налегающей толще пород и последующем их самообрушении.

Полученные результаты исследований реакции массива на мощные технологические взрывы показали, что сейсмические процессы тесно взаимосвязаны со структурными неоднородностями массива горных пород, в частности разрывными тектоническими нарушениями различного ранга и происходят на различных уровнях. Характер сейсмичности и уровень ее интенсивности может варьировать в значительной степени в зависимости от геолого-структурных и горнотехнических условий. Технологические взрывы большой мощности могут вызывать техногенные землетрясения значительной силы, благодаря динамическому воздействию на высоконапряженные участки массива пород, прилегающие к разломам.

3.5. ПОВЕДЕНИЕ БЛОЧНОГО МАССИВА В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ПОСЛЕ НЕГО

Известно, что сильные землетрясения приурочены к разрывным нарушениям, что отчетливо видно на картах сейсмичности. На связь сейсмичности с разломами указывают многие авторы, однако, в их работах речь идет о крупных глубинных разломах. Поэтому представляется весьма интересным провести анализ проявления сейсмичности иерархической блочной системы, которая представлена небольшими по размерам блоками.

Участок, на примере которого рассмотрены и проанализированы данные сейсмологических наблюдений, расположен в пределах шахтного поля Кировского рудника. Массив разбит серией разломов, среди которых выделяются следующие: поперечный 1, поперечный 2, поперечный 3, диагональный и Ворткеуай. Местоположение разломов показано на рисунке 14. Поперечный разлом 1 расположен на северном фланге участка и представлен системой субпараллельных трещин, близи которых породы и руды подвергнуты слабой шпреуштейнизации. Мощность зоны разло-

ма составляет около 1 м. Простирание восточное юго-восточное (100°), падение на юго-запад, под углом $80-85^\circ$. Поперечный разлом 2 представлен зоной шпреуштейнизации мощностью от 3 м на западе, до 1,5 м на востоке. Простирание с запада на восток, падение крутые, на юг, угол падения $85-90^\circ$. Поперечный разлом 3 представлен субвертикальной зоной шпреуштейнизации, мощностью 6-8 м. Азимут простирания около 65° .

Диагональный разлом разветвлен на две части, представлен зоной шпреуштейнизации мощностью 4-5 м. Азимут простирания 120° , падение на юго-запад под углом 50° . Разлом Ворткеуай имеет простирание $340-360^\circ$ и падает на запад под углом 55° . Представлен зоной дробления с развитой по ней шпреуштейнизацией. Мощность зоны разлома составляет 10-18 м.

По данным визуальных обследований и инструментальных наблюдений вблизи всех разломов, за исключением поперечного разлома 3, отмечаются участки повышенных напряжений, сформировавшиеся под воздействием сжимающих напряжений. Поперечный разлом 3 ориентирован строго по направлению действия максимального горизонтального напряжения и сформировался в условиях растяжения. Анализ сейсмологических исследований за период с июля 1987 года по май 1989 года включительно показал, что в пределах наблюдаемого участка до землетрясения сейсмическая активность возрастает как вблизи некоторых разломов, так и по всей площади блоков. После землетрясения происходит ее спад, уменьшается количество событий, их энергия. Такая зависимость наблюдается при землетрясениях с магнитудой M до 2, произошедших на удалении до 7-8 км.

В случае проявления землетрясений с магнитудой три и более снижение сейсмической активности в блоках контролируемого участка происходит и при удаленности до 20 км, т.е. в процессе подготовки землетрясений принимает вся система блоков 4 ранга, в которых ведутся горные работы.

На рисунке 48 а, б, в показано изменение сейсмического ритма вблизи поперечных разломов до и после землетрясения. По оси абсцисс отложено расстояние от разломов в сторону висячего и лежачего блоков, а оси ординат – суммарная энергия событий в дюоулях. Энергия, выделившаяся до землетрясения, показана сплошной линией, а после него – пунктиром.

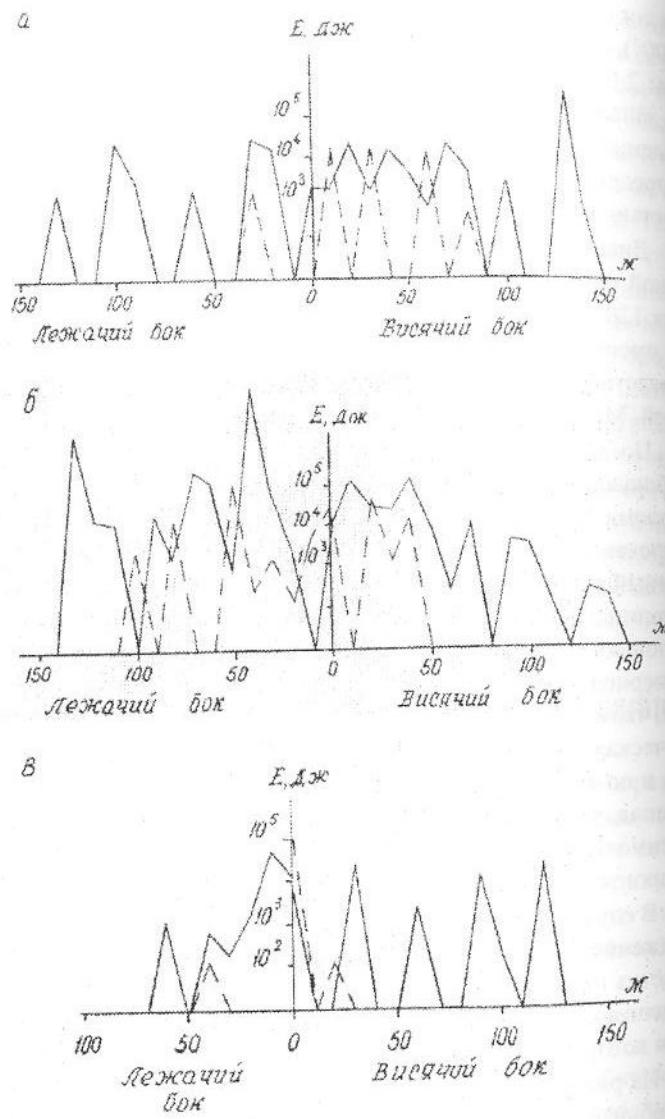


Рис. 48 а, б, в. Распределение энергии сейсмических событий близи поперечных разломов до (сплошная линия) и после (пунктир) землетрясения 16 апреля 1989 г.
а – поперечный разлом 1; б – поперечный разлом 2; в – поперечный разлом 3.

Из рисунка можно видеть, что в зонах влияния разломов происходило большее количество сейсмических событий и выделялось больше сейсмической энергии до землетрясения, чем после него. До землетрясения сейсмические события охватывали практически всю площадь смежных блоков, а после него уменьшились не только площадь, занятая толчками, но и количество выделившейся сейсмической энергии. Особенно наглядно это проявилось вблизи разлома 3, который непосредственно ограничивает блок, сместившийся после землетрясения. В зоне этого разлома, как и в разломе 2, после землетрясения выделялось несколько большее количество сейсмической энергии. Толчки отмечались на протяжении 3-4 суток. После этого, в них события не наблюдались. Видимо, наряду с разгрузкой внутри геодинамических блоков после землетрясения, некоторое время они «успокаиваются» и приходят в равновесное состояние непосредственно по зонам разломов.

В висячих боках разломов до и после землетрясения наблюдалось большее количество толчков, чем в лежачем. Здесь сказывается эффект разгрузки от напряжений, действовавших в массиве, что привело к раскрытию трещин, дальнейшему прорастанию их и подвижкам с образованием новых трещин, вызывающих сейсмические события различного энергетического уровня.

Здесь приведен лишь один пример поведения блочного массива до и после землетрясения. За этот период в Хибинах отмечено 15 землетрясений, удаленных от контролируемого участка на расстояние до 18 км. При этом изменение сейсмического режима деформирования как в блоках, так и зонах разломов отмечалось не всегда. Для объяснения влияния удаленных землетрясений на поведение массива вблизи контролируемых разломов предложено учитывать энергию землетрясения и расстояние до его эпицентра. Полагалось, что интенсивность воздействия на контролируемый участок массива прямо пропорциональна энергии землетрясения и обратно пропорциональна квадрату расстояния от очага до места наблюдения.

В результате установлен некий уровень сейсмического воздействия на участки массива, прилегающие к разломам, при котором происходит снижение их активности после землетрясения. Этот уровень составляет около $10^7 - 10^8 \text{ Дж/км}^2$. Конечно, эта величина, то есть её численное значение зависит от многих факторов, таких как: особенности применяемой регистрирующей аппаратуры и методик обработки данных, физико-механических

свойств слагающих пород и др., и для различных условий наблюдений может отличаться. Однако сам факт такого явления представляется важным и может служить одним из критериев прогноза техногенных землетрясений и горнотектонических ударов. Теоретические обоснования возможности прогноза землетрясений на основе регистрации сейсмических событий малых энергий изложены в работах [101, 113, 114, 115, 116, 117].

Таким образом, приведенные данные показывают, что в подготовке даже слабых землетрясений, магнитуда которых составляет $M=2\text{--}4$, принимают участие значительные участки земной коры, что отражается на изменении сейсмического режима в блоках 5 ранга и на их границах, зафиксированного путем регистрации событий малых энергий, несмотря на то, что землетрясения происходят в более крупных, удаленных блоках.

Иерархически-блочная система участвует в подготовке землетрясения в целом на всех уровнях ее иерархии и откликается на сейсмические события также на всех уровнях. При этом, после землетрясения уровень напряженности внутри блоков существенно снижается, но, в большинстве случаев остаются активными, или повышают активность, сами зоны разломов, то есть блоки приходят в свое новое равновесное расстояние..

4. ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ МАГНИТУДЫ ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Проектирование и строительство различных объектов и сооружений в сейсмичных районах должно осуществляться на основе изучения сейсмических условий их размещения и с оценки сейсмической опасности. Для этих целей необходимы сведения о максимально возможной магнитуде землетрясения, которое может произойти в том или ином районе, где планируется строительство. Особую актуальность эти сведения приобретают в тех случаях, когда планируется сооружение потенциально экологически опасных объектов в районах с недостаточно изученной сейсмичностью.

Оценка максимально возможной магнитуды землетрясения в каждом конкретном регионе представляет собой важную сейсмологическую задачу как с практической, так и с теоретической стороны. Землетрясения, близкие к максимальным, выделяют большую часть сейсмической энергии, поэтому значение M_{max} по сути дела определяет полную сейсмическую энергию, которая может быть выделена в среднем за единицу времени в данной области.

Величина M_{max} зависит от геолого-структурного строения данного района, особенностей протекающего в нем сейсмотектонического процесса и определяется как геологическим и тектоническим строением района, так и различными геофизическими полями и сейсмологическими характеристиками. Поиск физических закономерностей определения максимально возможной магнитуды землетрясения является сложной и до конца не решенной задачей, поэтому, в большинстве случаев, оценка ее осуществляется лишь по сейсмологическим данным, имеющимся по исследуемому региону. Для оценки максимально возможной магнитуды землетрясения по сейсмологическим данным необходимы представительные материалы многолетних непрерывных наблюдений, характеризующие сейсмологический режим района. Однако, сеть сейсмостанций не всегда позволяет иметь такие данные по всей территории, поскольку большая часть ее отнесена к асейсмичной, или с проявлениями слабых землетрясений, поэтому станций там просто нет.

Неравномерность распределения сейсмичности связана с дискретным строением земной коры, которая сохраняется в те-

чение весьма длительного времени. Взаимосвязь сейсмичности с тектоническими нарушениями обусловлена тем, что на участках, не осложненных разломами, землетрясения не отмечаются и подавляющее их большинство происходит в тектонически активных районах, но проблема техногенной сейсмичности, возникновение которой связано с крупномасштабным воздействием на приповерхностную часть земной коры, заставляет искать новые решения в оценке максимально возможных магнитуд землетрясений.

Хибинский массив представляет иерархически блочную систему, напряженно-деформированное состояние которой определяется степенью активности разломов и характером взаимодействия геодинамических блоков различного ранга. Это взаимодействие проявляется на различных уровнях системы и в различных формах.

Разрывные тектонические нарушения при этом являются концентраторами исходного поля напряжений, вблизи них формируются предельно напряженные участки массива и, главным образом разломы определяют формирование удароопасной обстановки при проведении горных выработок.

Многолетняя интенсивная эксплуатация месторождений связана с выемкой и перемещением огромных масс (несколько миллиардов тонн) руд и пород оказывает существенное влияние на изменение напряженно-деформированного состояния массива в районе ведения горных работ. За счет извлечения полезного ископаемого и покрывающих пород уменьшается гравитационная составляющая поля напряжений, на других же участках, в местах создания отвалов и хвостохранилищ, осуществляется пригрузка на массив.

Изменение вида напряженно-деформированного состояния на таких участках массива приводит к его изменению и на границах блоков - вблизи зон разломов, в предельно напряженных участках массива. Расчеты показывают, что в результате очистной выемки величина вертикальных литостатических напряжений отдельных участках шахтного поля уменьшается на 9-12 МПа, при сохранении действующих в массиве субгоризонтальных тектонических напряжений 30-80 МПа. При этом происходит возрастание сдвиговых напряжений в плоскости разлома на 9 - 20 МПа, что по величине весьма близко к критическим значениям и при дальнейших внешних воздействиях (извлечение полезного ископаемого или мощные технологические взрывы) происходят внезапные

срывы и подвижки, вызывая техногенные землетрясения, которые приводят к опасным и даже катастрофическим последствиям. В результате сместившийся блок сбрасывает накопленную энергию упругих деформаций и меняются условия и характер его взаимодействия с соседними блоками, что в свою очередь приводит к изменению напряженного состояния на границах близрасположенных блоков. В результате некоторые блоки также могут потерять устойчивость, изменяя тем самым и свойства среды. Отдельные блоки могут испытывать внезапные скачкообразные подвижки и срывы по естественным плоскостям ослабления, какими являются разрывные нарушения различного масштабного уровня, могут изменять при этом свою конфигурацию и сбрасывать накопленную потенциальную энергию упругих деформаций, что проявляется в виде сейсмических событий различного энергетического уровня. Возможно также и образование новых разрывов.

Часть блоков может взаимодействовать с окружающими их как единое целое, то есть является консолидированной системой блоков более высокого ранга, которая, в свою очередь, также может терять устойчивость. В пределах Хибинского массива это происходит таким образом, что блоки четвертого ранга представляют собой консолидированную систему в пределах границ блока третьего ранга, а блоки третьего ранга - в пределах границ блоков второго ранга. Блоки же второго ранга, взаимодействуя между собой, представляют единую консолидированную систему - Хибинский массив, что наглядно подтверждается многочисленными геоморфологическими, геолого-структурными данными и материалами инструментальных наблюдений, в том числе и сейсмологических.

Внутри блоков 4 ранга, в силу наличия в них плоскостей ослабления в виде различных структурных неоднородностей, также происходит накопление, перераспределение и сброс упругой энергии, что проявляется в виде сейсмических событий малых энергий, регистрируемых сейсмостанцией АО «Апатит» в подземном руднике. При этом отмечается, что напряженно-деформированное состояние вблизи разломов 5 ранга (более высокого по отношению к четвертому рангу) меняется в зависимости от поведения системы в целом и выражается в изменении количества выделяемой сейсмической энергии в самих разломах и зонах их влияния в период процесса подготовки землетрясения и после него. Это явление наблю-

дается и в том случае, когда землетрясение готовится и происходит на значительном удалении (до 15-20 км) от разломов 5 ранга, что в несколько раз (до 20) превышает размеры контролируемых блоков. Для этого необходимо лишь соблюдение условия, что разгрузка после землетрясения в любой конкретной точке системы, удаленной от эпицентра, происходит в том случае, если интенсивность сейсмического воздействия в ней превышает некий уровень.

То есть, в процессе взаимодействия участвует вся блочная система. При этом накопление системой потенциальной энергии упругих деформаций и перераспределение ее между составляющими блоками различного ранга осуществляется как за счет естественных процессов развития земной коры, так и в результате техногенных воздействий. При достижении предельного критического уровня в предельно напряженных участках массива, в данном случае вблизи зон разломов, происходит сброс энергии, что проявляется в виде землетрясений. Энергия, выделяющаяся при землетрясениях тем больше, чем больше размеры блоков, потерявших устойчивость, или размеры консолидированных систем, вышедших из равновесного состояния. Но, при этом, сама система остается иерархически блочной, меняется лишь ее состояние и она стремится к своему новому равновесному положению, что проявляется в смене сейсмического режима деформирования.

Местоположение сейсмических событий приурочено к краевым частям блоков, то есть непосредственно к разломам, или зонам их влияния, в которых напряженно-деформированное состояние участков массива достигает предельного и, по плоскостям ослабления (разломам) происходят внезапные подвижки и смещения с выделением сейсмической энергии. Образование же новых разрывов, при наличии имеющихся плоскостей ослабления, в большинстве своем, возможно лишь как результат подвижки по имеющемуся более крупному разлому, в процессе которой образуются оперяющие трещины.

При достижении критических значений совместного природного и кумулятивного (накопленного) техногенного воздействия в наиболее нагруженных блоках, или системах блоков возникает неустойчивость, связанная с предельным накоплением упругой энергии и резким сбросом ее в окружающее пространство, что проявляется в виде сейсмических событий. Объем горной породы,

в котором накопление энергии упругих деформаций достигает предельных значений, или, что то же самое, сейсмоактивный блок, является очагом землетрясения. Он обладает определенными размерами и отделен от окружающих блоков разломами, прочность которых меньше прочности самого сейсмоактивного блока.

Под таким блоком следует понимать не только отдельный конкретный блок, но и консолидированную систему блоков. Поэтому, процесс частичной потери устойчивости и сброса энергии в виде сейсмических волн может произойти в любой точке системы разломов и зон их влияния, то есть по границам сейсмогенного блока, ограниченного разломами.

Отсюда следует, что зная свойства и параметры сейсмогенного блока, или активизированной системы блоков, можно оценить и максимально возможную магнитуду землетрясения для этого района.

Зависимость энергии сейсмических волн от объема очага землетрясения установлена, например, в работах [109]. В них под сейсмическим очагом понимается объем, занимаемый гипоцентрами афтершоков. В наших условиях это будет соответствовать площади блоков. Эта зависимость имеет вид:

$$E_c = a V_c$$

где: если E_c в джоулях, V_c в km^3 , то $a=10^{11}$. Используя формулу Гутенберга - Рихтера

$$\lg E_c = 1.5M + 4.8$$

получим

$$M_{\text{tax}} = 2/3 \lg V_c + 4,1$$

$$M_{\text{tax}} = \lg S + 4,1$$

в этом случае S измеряется в km^2 .

Подставляя средние значения площади геодинамических блоков различного ранга в полученные выражения, определим максимально возможные магнитуды техногенных землетрясений в Хибинах в случае активизации блоков соответствующих рангов.

Значения максимально возможных магнитуд техногенных землетрясений составят:

- для блоков 2 ранга $M_{\text{max}} = 6,0$
- для блоков 3 ранга $M_{\text{max}} = 5,2$
- для блоков 4 ранга $M_{\text{max}} = 4,8$

Площадь самого большого блока, в пределах которого извлекается полезное ископаемое, составляет 123 km^2 . В случае его ак-

тивизации максимально возможная магнитуда землетрясения не должна превысить $M_{max} = 6,2$.

Площадь блока, в котором 16 апреля 1989 года произошло землетрясение с магнитудой $M = 4,1\text{--}4,5$, составляет 4 км^2 . Максимально возможная магнитуда землетрясения в этом случае не должна была превысить $M_{max} < 4,7$, что и произошло в действительности.

Подобный подход к оценке максимально возможной магнитуды землетрясения изложен в работе [85], в которой он назван «метод сейсмических пятен». Однако авторы указанной работы не учитывают размеры блоков, а принимают во внимание площади, занятые эпицентрами землетрясений. При этом справедливо указывают на необходимость доработки и уточнения предложенной методики «...использованные приемы оконтуривания пятен эпицентров и определения их площадей чрезвычайно примитивны и позволяют говорить только о непротиворечивости полученных результатов данным опытных наблюдений. Свидетельствуя о разумности этих приемов, полученные результаты одновременно указывают на необходимость их усовершенствования и стандартизации.» [118, стр.32]

Использование же площади тектонически активных геодинамических блоков различного масштабного уровня, которые могут стать сейсмогенными, наиболее полно и точно отражает параметры взаимодействующих элементов иерархически блочной структуры, поскольку размеры блоков ограничены разломами в явном виде. Поэтому вопрос о площади сейсмогенных структур снимается сам собой, поскольку в каждом случае достаточно измерить лишь площади выявленных блоков.

Кроме того, в силу иерархичной подчиненности структур представляется возможным прогнозировать сейсмические события и их максимально возможную магнитуду на различных этапах эксплуатации месторождений, поскольку активизация блоков происходит в соответствии с их рангами, начиная с блоков меньших по площади.

Таким образом, предложенный подход к оценке максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения позволяет учитывать размеры геодинамических блоков, участвующих в формировании очага землетрясения, что значительно повышает достоверность получаемых результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуркин К.А. Главные черты геологического развития архея Северо-западного Беломорья//Л.: Тр. ЛАГЕТ АН СССР, вып 9, 1960.
2. Перевозчикова В.А. и др./Тектоника восточной части Балтийского щита. Л.: Недра, 1974. – 287 с.
3. Поляк Е.А. Геологическое строение Печенгской структуры// Геология и глубинное строение Восточной части Балтийского щита. Л.: 1968.
4. Кратц К.О. Геология карелид Карелии. М.Л.: Изд. АН СССР, 1963.
5. Вяюрюнен Х. Кристаллический фундамент Финляндии// М.: ИЛ, 1959.
6. Makinen J/ at al. The Fennoscandian Land Uplift Gravity Lines 1966-1984/ Reports of the Finnish Geodetic Institute 85: 4, Helsinki, 1986.
7. Мещеряков Ю.А. Избранные труды//М.: Наука, 1987. – 278 с.
8. Robrt M. Wood. Extraordinary Deglacion Revers Faults in Northern Fennoscandia // Neotectonics and Postglacial Rebaund. Kluwer Academic Publishtrs, 1989, pp. 141-173.
9. Граве М.К., Евзеров В.Я. Новейшие и современные тектонические движения в центральной части Кольского полуострова. М.–Л.: Наука, 1964.
10. Лаврова М.А. Четвертичная геология Кольского полуострова//М.–Л.: Изд АН СССР, 1960.
11. Никонов А.А. Развитие рельефа и палеогеография антропогена на западе Кольского полуострова//М.–Л.: Наука, 1964.
12. Арманд А.Д., Самсонова Л.Я. Морские отложения и голоценовая тектоника района Кандалакши//М.–Л.:Наука, 1969
13. Цирульникова М.Я., Сокол Р.С. Особенности тектонического строения восточной части Балтийского щита по геофизическим данным//Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1968. – С58-63.
14. Николаев Н.И. и др. Вопросы неотектоники Балтийского щита и норвежских каледонид//Сов. Геология.–1967.– №3.
15. Яковлев В.М. Линии нивелирования 1 класса Кандалакша-Ковда//Сейсмические и геодинамические исследования на северо-

- востоке Балтийского щита. – Апатиты, АН СССР, 1979. – С.68-72.
16. Яковлев В.М. Об интерпретации повторных нивелирований по линии Титан-Расвумчорр//Сейсмические и геодинамические исследования на северо-востоке Балтийского щита. – Апатиты, АН СССР, 1979. – С. 73-79.
17. Яковлев В.М. Современные движения земной коры по данным геометрического нивелирования//Геофизические и геодинамические исследования на северо-востоке Балтийского щита. – Апатиты, АН СССР, 1982. – С.88-95.
18. Яковлев В.М. Геофизический микрополигон на уровне посту в Дальнних Зеленцах//Геофизические исследования на европейском севере СССР. – Апатиты, АН СССР, 1983. – С.104-107.
19. Е.О.Кременецкая и др. Первые результаты наблюдений на геодинамическом полигоне в районе Кольской АЭС//Геофизические исследования литосферы европейского севера СССР. – Апатиты, АН СССР, 1989. – С.56-59.
20. Баржицкий В.В. Тектонические черты северо-восточной части Балтийского щита по космогеологическим данным//Геотектоника,1987, №6. – С. 16-18.
21. Баржицкий В.В., Кременецкая Е.О. Современная геодинамическая активность восточной части Балтийского щита//Геофизические исследования литосферы европейского севера СССР. – Апатиты, КНЦ АН СССР, 1989. – С.35-41.
22. Гришин А.С. Геоблоки Балтийского щита//Методика и результаты геофизических исследований докембрийских пород восточной части Балтийского щита. – Петрозаводск, Карельский филиал АН СССР, 1987. – С.5-13.
23. Николаев Н.И. Поздний этап неогеотектонических движений Скандинавии, Карелии, Кольского полуострова//М.: ДАН СССР, 1966, т. 167, №6. – С.1358-1361.
24. Ассиновская Б.А. Механизмы очагов землетрясений северо-восточной части Балтийского щита//Изд. АН СССР, Физика Земли, 1986, №6. – С.101-106.
25. Ружич В.В. Физико-механические условия формирования зеркал скольжения в зонах разломов//Геология и геофизика, 1988, №11.-С.38-44.
26. Козлов М.Т. Разрывная тектоника восточной части Балтийского щита//Л.: Наука, 1979. – 140 с.
27. Панасенко Г.Д. Техногенная активизация тектонических процессов в Хибинском массиве, задачи и пути их изучения//Геофизические исследования на европейском севере СССР. – Апатиты, АН СССР, 1983. – С.25-37.
28. Марков Г.А. и др.Прецезионные измерения техногенных деформаций в массиве//Инж. геология, 1980, №4. – С.110-116.
29. Сырников Н.М., Тряпицын В.М. О механизме техногенного землетрясения в Хибинах//ДАН СССР, 1990, т. 314, №4. – С. 830-833.
30. Тряпицын В.М. и др. Современная тектоника и сейсмичность Хибин//Белорусский сейсмологический бюллетень. – Минск, ОНТИИ, 1992. – С.24-35.
31. Возбужденная сейсмичность в районе водохранилища Нурекской ГЭС/ Мирзоев К.М. и др.//Дониш, Душанбе-Москва, 1987. – 402 с.
32. Гупта Х., Растиги Б. Плотины и землетрясения// М.: Мир, 1979. – 251 с.
33. Токарев В.А. Главные глубинные разломы Кольского полуострова// Геологическое строение, развитие и рудоносность Кольского полуострова. – Апатиты, КФАН СССР. – С.97-112.
34. Галахов А.В. О проявлении щелочно-ультраосновного магматизма в Хибинских тундрах//ДАН СССР, 1966, т. 170, №3
35. Шаблинский Г.Н. К вопросу о глубинном строении Хибинского и Ловозерского plutонов//Труды Ленинградского общества естествоиспытателей природы. – Л.: 1963, т. 74, вып. 1.
36. Шаблинский Г.Н. Новые данные о тектонике Хибинского plutона//Химия в естественных науках. – Л.:1965. – С.37-42.
37. Галахов А.В. Петрология Хибинского щелочного массива.– Л.:Наука, 1975. – 255 с.
38. Новые Хибинские апатитовые месторождения//Под ред. Е.А. Каменева, Д.А. Минеева. – М.: Недра, 1982. – 189 с.
39. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок/Турчанинов И.А. и др.// Л.: Наука, 1978. – 256 с.
40. Марков Г.А. О модели формирования избыточных горизонтальных напряжений в горных породах под влиянием восходящих движений земной коры//Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. – Апатиты, КФАН СССР, 1982. – С. 52-58.

41. Николаев П.Н. Системный подход в анализе и картировании полей тектонических напряжений// Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. – Апатиты: КФАН СССР, 1982. – С. 18-34.
42. Гзовский М.В. Основы тектонофизики// – М.: Наука, 1975. – 536 с.
43. Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений//Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М.: Наука, 1979. – С. 7-25.
44. Корчемагин В.А., Емец В.С. К методике выделения и реконструкции полей напряжений//ДАН СССР, 1982, т. 263, №1. – С.163-168.
45. Геодинамическое районирование недр/Методические указания под ред. Петухова И.М., Батугиной И.М.// – Л.: ВНИМИ, 1990. – 128 с.
46. Профилактика горных ударов и выбросов с учетом геодинамики месторождений//Безопасность трудоавтомобильности, 1984, №7. – С. 56-60.
47. Работа Э.Н., Батугина И.М. Механизм формирования напряженного состояния массива горных пород//Профилактика горных ударов при строительстве и проектировании шахт. – Л.: ВНИМИ, 1985. – С.11-25.
48. Смирнов В.А. Физические процессы в очагах горных ударов и региональный прогноз их по геофизическим полям//Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук в виде научного доклада. – С.-Петербург: ВНИМИ, 1991. – 50 с.
49. Козырев А.А. Дифференциация тектонических напряжений в верхней части земной коры с целью управления динамическими проявлениями горного давления//Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. – Апатиты: КНЦ РАН, 1993. – 43 с.
50. Садовский М.А. О карте сейсмических очагов//Изв. АН СССР, Сер. Физика Земли, 1989, №8. – С. 3-14.
51. Орлова А.В. Блоковые структуры и рельеф// – М.: Недра, 1975. – 322 с.
52. Батугина И.М., Петухов И.М. Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников// – М.: Недра, 1988. – 165 с.
53. Тряпицын В.М. Геодинамическое районирование апатито-нефелиновых месторождений Хибин//Геодинамика месторождений. – Кемерово, КузПИ, 1988. – С. 31-42.
54. Тряпицын В.М. Разработка комплекса мер предотвращения горных ударов при отработке глубоких горизонтов Хибинских апатито-нефелиновых месторождений с учетом геодинамики//Автореф. канд. диссертации. – Л.: ВНИМИ, 1988. -16 с.
55. Мещеряков Ю.А. Изучение современных движений земной коры и проблема прогноза землетрясений//М.: ВИНТИ, 1968, №3. – С.17-23.
56. Сажин М.В. Мощность земной коры и связь её с рельефом и аномалиями силы тяжести//Советская геология, №8, 1962. – С. 151-156.
57. Ромашев В.А. Основные черты развития юго-западных склонов среднерусской возвышенности//Ученые записки Курского государственного педагогического института. 1970, вып. 69. – С. 23-38.
58. Апролов В.А. Масштабные ранги новейших тектонических структур//Музей землеведения МГУ. 1970, №6. – С.5-15.
59. Оливер К. Тектоника и рельеф// – М.: Недра, 1984. – 459 с.
60. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы// – М.: Недра, 1988. – 491 с.
61. Кошечкин Б.И., Стрелков С.А. Проявления новейшей тектоники на северо-востоке Балтийского щита//Новейшие и современные движения земной коры в восточной части Балтийского щита. – Петрозаводск, Карелия, 1984. – С.16-21.
62. Никонов А.А. Новейшие и современные движения земной коры// – М.: Наука, 1977. – 285 с.
63. Гладчин И.Н. Геоморфологические наблюдения в Хибинских тундрах//Тр. Института по изучению Севера. 1928, т. 39.
64. Чирвинский И.Н. Палеогидрология Хибинских тундр//Изв. АН СССР, сер. геологическая, 1939, №4.
65. Арманд А.Д., Дорфман М.Д. К вопросу о происхождении отрицательных форм рельефа Хибинского щелочного массива//Изд. Карельского и Кольского филиалов АН СССР, 1959, №1.
66. Рихтер Г.Я. Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна// – Л.: 1934.

67. Онохин Ф.М. Особенности структуры Хибинского массива//Л.:Наука, 1975. – 105 с.
68. Хибинские и Ловозерские тундры//Тр. Института по изучению Севера, т. 1, 1925, вып. 29. – 196 с., т. 2, 1928, вып. 39. – 398 с.
69. Мурзаев П.М. О возрасте и образовании ущелий южного склона Хибинского массива//Изд. Ленинградского геологогеодезического треста, 1935, вып. 1. – С. 119-130.
70. Рихтер Г.Д.Физико-географический очерк озера Имандра// М.-Л: ПТИ, 1934. – 144 с.
71. Арманд А.Д. Очерк формирования рельефа и четвертичных отложений Хибинских тундр//Вопросы геоморфологии и геологии осадочного покрова Кольского полуострова. –Апатиты, КФАН СССР, 1960. – С.32-84.
72. Карпов Н.Н. Следы послеледниковых тектонических разломов в Хибинских горах// Вестник МГУ, сер. 5, 1960, №4. – С. 61.
73. Граве М.К., Евзеров В.Я. Новейшие и современные тектонические движения в центральной части Кольского полуострова// Современные движения земной коры, №1, - М.: АН СССР, 1963. – С. 326-333.
74. Буссен И.В. Проявления молодых послеледниковых дислокаций в рельефе южного склона Руяврута//Рельеф и геологическое строение осадочного покрова Кольского полуострова. – М.: Наука, 1964. – С. 77-79.
75. И.Г. Авенариус. Морфоструктурный анализ зоны новейших дислокаций на южном склоне Хибин//ДАН СССР, геоморфология, вып. 2, 1989. – С. 52-56.
76. Марков Г.А. и др. Знакопеременные деформации массива в зоне влияния выемки горной массы//Физические процессы горного производства. Межвузовский сборник, вып. 5. – Л.: изд. ЛГИ, 1978. – С. 31-34.
77. Панасенко Г.Д., Яковлев В.М. О природе аномальной деформации транспортного тоннеля в горе Юкспор//Геофизические исследования на европейском севере СССР. – Апатиты, изд. КФАН СССР, 1983. – С.38-44.
78. Тряпицын В.М., Сырников Н.М. Особенности проявления горного давления при отработке месторождений высоконапряженных тектонически нарушенных массивах//ФТПРИ, №5. –С. 32-41.
79. Тряпицын В.М., Кабеев Е.В. Горнотектонические удары на рудниках Хибин//Исследование, прогноз и предотвращение горных ударов (материалы 9 Всесоюзной конференции по механике горных пород, Бишкек, 3-5 октября 1989 г. – Бишкек.: Илим, 1991. –С.174-185.
80. Мещеряков Ю.А. Молодые тектонические движения и эрозионно-аккумулятивные процессы в северо-западной части Русской равнины//– М.: Изд. АН СССР, 1961.
81. Люстих Е.Н. О расчете реологических свойств астеносферы по «всплытию» Фенноскандии//Изв. АН СССР, сер. геофизическая, №3, 1956.
82. Honskasalo T. On the use of gravity measurements for investigation of the Land uplift in Fennoscandia. Fennia, vol. 89, №1, Helsinki, 1963.
83. Богданов В.И. Новейшие движения и региональное гравитационное поле Фенноскандии//Современные движения земной коры. –Тарту.: Изд. АН ЭССР, №2, 1965.
84. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики//–М.: Наука, 1969. -511 с.
85. Садовский М.А. и др. Деформирование среды и сейсмический процесс//–М.: Наука, 1987. – 101 с.
86. Садовский М.А. и др. Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности//Изв. АН СССР, Физика Земли, 1984, №2, – С. №-15.
87. Обследование горных выработок удароопасных месторождений/ Юров А.С., Тряпицын В.М. и др./Безопасность труда в промышленности. 1986, №2. – С. 51-52.
88. Марков Г.А., Тряпицын В.М. и др. Некоторые особенности взаимосвязи трещинной тектоники и полей напряжений на Кукисумчорском месторождении//Тектонические основы и инженерно-геологические аспекты изучения напряженного состояния горных пород при разведке и эксплуатации месторождений. – Апатиты, 1985. – С. 31-38.
89. Галахов А.В. Интрузивные комплексы Хибинского щелочного массива//Научный отчет, фонды КФАН СССР, 1962.
90. Хибинский щелочный массив/ Зак С.И., Каменев Е.А. и др./–Л.: Наука, 1872. – 116 с.

91. Каменев Е.А. Трещинная тектоника Хибинского щелочного массива//Магматизм и геология Кольского полуострова. – М.: Наука, 1963.
92. Гзовский М.В. Физическая теория образования тектонических разрывов//Проблемы тектонофизики. – М.: Госгеолтехиздат, 1960. – С. 78-94.
93. Гзовский М.В. Математика в геотектонике//–М.: Недра, 1971. – 238 с.
94. Методические указания по сейсмоакустическим и электромагнитным методам получения критерия степени удароопасности//–Л.: ВНИМИ, 1986. – 32 с.
95. Тихомиров И.К. Подземные толчки в Хибинском массиве//Изв. ВГО, 1949, т. 81, вып. 2. – С. 251-252.
96. Тихомиров И.К. Подземные толчки в Хибинском горном массиве(Кольский полуостров)//Природа, 1949, №9. – С. 55-57.
97. Панасенко Г.Д. Землетрясение в Хибинах//Природа, 1956, №7. – С. 110-111.
98. Панасенко Г.Д. Сейсмичность Кольского полуострова и северной Карелии//Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1957, №8. – С.969-978.
99. Панасенко Г.Д. Каталог землетрясений Кольского полуострова и северной Карелии (с 18 века по 1955 г.)//– Кировск, изд. КФАН СССР, №1. – С. 31-36.
100. Панасенко Г.Д. Землетрясения на Кольском полуострове 2 и 9 февраля 1960 г. //Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1961, №4. – С. 567-573.
101. Скоростная модель среды для района Хибинского массива/ Кузьмин И.А. и др.– Апатиты, КНЦ РАН, 1994. Препринт. – 16 с.
102. Meyer K and Ahgos. Temporal Variations of Energy Release by Earthquakes in the Baltic Shield. *Geophysica*, 21, (1). pp. 51-64.
103. Тряпицын В.М. и др. Современная тектоника и сейсмичность Хибин//–Минск, ОНТИИ, вып. 2, 1992. – С. 24-35.
104. Влияние крупномасштабных горных работ на техногенную сейсмичность в блочных массивах/Тряпицын В.М. и др./Прогноз – и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. – Апатиты, КНЦ РАН, 1993. – С. 76-83.
105. Кондратьев С.В. и др. Натурные измерения относительных перемещений на разломе в горном массиве при мощном техногенном воздействии//Динамические процессы в геосферах. – М.: ИДГ РАН, 1994. – С. 80-87.
106. Тряпицын В.М. и др. Изменение сейсмического режима иерархически блочной системы при интенсивном техногенном воздействии//Изв. ВУЗов, Северо-Кавказский регион. Естественные науки, 1996, №1. – С.56-59.
107. Некоторые вопросы исследования геодинамики Хибинских апатитовых месторождений на основе непрерывной автоматизированной регистрации сейсмичности/Тряпицын В.М. и др. //Тезисы докладов научно-технического семинара по горной геофизике. – Батуми, 1985. – С.157.
108. Kremenetskaya E.O., F. Ringdal, I. Kusman, v. Asming. *Stismijgical aspects of mining activity in Khibiny. Apatity*, KRSC RAS, 1995. pp. 25, preprint.
109. Тсубои Ч. Энергия землетрясений, объем гипоцентральной области, площадь афтершоков и прочность земной коры. Слабые землетрясения//–М.: ИЛ, 1961. – С. 160-164.
110. Распопов О.М. и др. Новый инструмент исследований в горной геофизике//Вестник АН СССР, №5, 1987. – С.6-15.
111. Комплекс методов геофизического и геодинамического анализа при изучении напряженно-деформированного состояния массива горных пород и их удароопасности/Иванов Г.А. и др./Горная геофизика. Материалы % Всесоюзного совещания, Ч. 2. – Тбилиси, 1989. – С. 178-179.
112. Сейсмологические исследования реакции на массовые взрывы высоконапряженных участков шахтного поля Кировского рудника/Дремов С.Н. и др./Геомеханическое обеспечение разработки месторождений Кольского полуострова. – Апатиты, КФАН СССР, 1989. – С. 31-36.
113. Тряпицын В.М., Беркман М.И., Попов В.А. Геодинамические свойства среды и сейсмические события малых энергий в зоне ведения интенсивных горных работ//Горный журнал, Изв. ВУЗов, 1992, №12. – С. 1-7.
114. Тряпицын В.М., Беркман М.И., Попов В.А. Влияние интенсивных горных работ в высоконапряженном массиве блочной структуры на сейсмическую активность//Горный журнал. Изв. ВУЗов, 1992, 34. – С.10-15.

МОНОГРАФИЯ

115. Тряпицын В.М., Беркман М.И., Попов В.А. Перестройка распределения сейсмической энергии низких уровней и прогноз горных ударов//Горный журнал, Изв. ВУЗов, 1993. – С. 1-8.
116. Тряпицын В.М. Геодинамическое районирование региона Хибин для обеспечения безопасности при широкомасштабных горных работах//Проблемы геодинамической безопасности. – С.-Петербург, ВНИМИ, 1997. – С. 270-276.
117. Опыт разработки удароопасных апатитовых месторождений Хибин/Тряпицын В.М. и др.//Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках. Под ред. И.М. Петухова. – М.: АГН, 1997. – 376 с.
118. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде//М.: Наука, 1991. – 95 с.

Тряпицын В.М.,
Шабаров А.Н.

СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНИКА
И ГЕОДИНАМИКА ХИБИН

Подписано в печать 11.12.2007 г.

Формат 60 x 90 1/32.

Уч.-изд. л. 4,3

Тираж: 100 экз.

Издание отпечатано
Авантий, 156013, г. Кострома, пр-т Мира, 51.
Т.: (4942) 55-28-62