

УДК 550.81+551.24(470.21)

Блоковые структуры Кольского полуострова, их устойчивость в условиях природно-технических систем (на примере горных массивов Хибины и Ловозеро)

О.П. Корсакова^{1,2}, В.В. Колька¹, С.Н. Савченко³

¹ Геологический институт КНЦ РАН,

² Апатитский филиал МГТУ, кафедра геологии и полезных ископаемых,

³ Горный институт КНЦ РАН

Аннотация. На основе морфометрических методов, методов ландшафтной индикации и анализа прочностных свойств пород установлены морфотектонические структуры Кольского полуострова, которые представлены блоками семи рангов, являются активными, созданными за счет взаимодействия эндогенных и экзогенных факторов при восходящем типе развития рельефа, когда скорость восходящих движений, возникающих вследствие горизонтального сжатия и сопротивления континентальной коры спредингу в соседних океанах, преобладает над скоростью денудационных процессов. Высотная дифференциация современного рельефа в регионе обусловлена в первую очередь восходящей тектоникой, на что указывает инверсия в соотношении литоморфных свойств пород и их выраженности в рельефе. Восходящие движения обеспечивают частичное освобождение от горизонтального сжатия, действующего на глубине, и растяжение (расширение) поднимающихся масс, с чем связано появление тектонических зон ослабленных разрыхленных пород, которые наследуются эрозионными долинами. С расширением поднимающихся масс связано перераспределение напряжений в массиве горных пород и устойчивость блоковых структур, а в условиях природно-технических систем, когда отмечается нарушение гравитационного баланса в результате разработки полезных ископаемых, последствия этого перераспределения в виде роста горного давления более значительны в массивах пород, расположенных ниже базисной поверхности рельефа.

Abstract. The Kola Peninsula has a block-structure pattern caused by the interaction of main geodynamic processes: continental drift, tectonic activity, and elastic resistance of rocks. The multirange morphotectonic blocks reflected the youngest tectonic structures of the Kola Peninsula and of the mountain massifs Khibiny and Lovozero as the key objects were identified with wide-using morphometric methods. Position location of the blocks' borders (tectonic zones) and their ranging were recognized by lineament analysis of valleys and tectonic faults presented in relief. The results were checked with aerial photo and satellite images and verified during field-work fixing their geological and landscape features. The discrepancy of the large- and medium-sized geological structures and land forms is established. The low-strength rocks correspond to the highest topographic forms, and the high-strength rocks – to the lowest ones. Geodynamic deformation of the topography surface is reflected in conditional amplitudes of the ascending of different morphotectonic structures. Determined conditional amplitudes are reached 1000 m. From the numerical simulation of stress state of the crust the regularities of stress distribution in the rock massifs depending on relief and lithospheric plate movements have been established. It has been determined the horizontal stresses are concentrated beneath the valley bottoms (beneath the enveloping base surface of relief), and within the uplands they decrease in comparison to applied tectonic stresses. The vertical tectonic stresses are tensile within the uplands and they are compressive beneath the valleys. Combined effect of the gravitation and of the horizontally oriented tectonic forces causes the interrelated lifting and lowering of the blocks – the valley areas are "sinking" and interfluvial areas are "floating" relatively to the general rising of the Baltic shield. Stability of the block structures and resistance of natural-engineering systems (mine workings, quarries, etc.) distorted the gravity equilibrium because mining operations depend on tectonic pressing at a depth and expanding at the block lift accompanied with the stress redistribution within rock massifs.

Ключевые слова: блоковые структуры, морфотектонические структуры, морфометрический анализ рельефа, линейменты, ландшафтные и геологические индикаторы тектонических зон, прочностные свойства пород, численное моделирование, природно-технические системы

Key words: block structure, morphotectonic structure, morphometric methods, topography, lineaments, landscape and geological indicators of tectonic zones, elastic resistance of rocks, numerical simulation, natural-engineering systems

1. Введение

Выяснение закономерностей пространственной делимости приповерхностной части земной коры наряду с вопросами глубинной тектоники является важной фундаментальной проблемой. Ее решение

связано с выполнением комплексных (геологических, тектонических, морфологических и др.) исследований. На неотектоническом этапе Кольский полуостров как часть Балтийского щита является геодинамически активной структурой с блоковым строением (Никонов, 1977), что главным образом обусловлено восходящими тектоническими движениями, неоднократными оледенениями и связанными с ними гляциоизостатическими проявлениями. Это в значительной степени определяет его индикаторный характер для выяснения особенностей развития верхней части земной коры. Значительное по масштабам промышленное освоение здесь крупнейших в мире месторождений апатит-нефелиновых руд, других полезных ископаемых приводит к активизации естественных геодинамических процессов, что провоцирует и острые экологические проблемы. В качестве реперных районов для изучения особенностей пространственной делимости верхней части земной коры и устойчивости образующихся структур были выбраны наиболее освоенные в хозяйственном отношении и тектонически активные структуры Кольского полуострова, а именно горные массивы Хибин и Ловозеро.

2. Использованные подходы и методические приемы

Примененная методика опиралась на следующие теоретические представления:

- структурная форма представляет собой обобщенное наименование тектонических деформаций независимо от масштабов и генезиса (Белоусов, 1975). Независимо от типа тектонических деформаций любая структура (структурная форма) выступает как сложная система, обладающая выраженным свойством, полученным под влиянием структурообразующих факторов. В качестве такого системного свойства принимается распределение абсолютных высот поверхности (рельеф), а структурообразующими факторами выступают современные движения литосферных плит и порожденные этими движениями силы, на региональном уровне отражающие влияние внешних геодинамических процессов, и проявление упругих свойств массивов горных пород, отражающее на этом же уровне влияние внутренних геодинамических процессов;
- блоковая структура массива горных пород обусловлена развитием упорядоченных иерархических систем нарушений сплошности – от микротрещиноватости и контактов между отдельными кристаллами до крупных разломов, простирающихся на сотни километров и разделяющих блоки земной коры. Структурообразующие факторы создают иерархически построенное поле естественных напряжений и обуславливают разрушение массива в виде отрыва и сдвига по разнопорядковым нарушениям сплошности (Каспарьян и др., 2001);
- поверхностным выражением глубинной тектонической делимости земной коры являются линеаменты (Космическая информация..., 1983), подчеркнутые, главным образом, эрозионными долинами, которые в пределах региона наследуют зоны тектонических нарушений, и чем выше порядок долины, тем более активную или глубокую тектоническую зону (зону ослабленных и разрыхленных пород кристаллического фундамента) она наследует.

Исходя из приведенных теоретических представлений, для выделения и ранжирования блоковых структур применялись методы морфометрического анализа рельефа поверхности (Хортон-анализ, построение объемлющих поверхностей), математического моделирования напряженного состояния пород в условиях гористого рельефа (метод граничных элементов в двухмерной постановке первой задачи теории упругости с использованием принципа независимости действия сил). Фактический материал был получен в результате дешифрирования аэро- и космоснимков, топокарт, в ходе полевых работ. Использовались геологические данные из опубликованных и фондовых источников.

2.1. Определение границ блоковых структур – линеаментов-блокоразделов

Положение границ блоковых структур и их ранг определялись в соответствии с положением разнопорядковых эрозионных долин, а также морфологически выраженных тектонических нарушений (ущелий, топографических уступов и т.п.), наследующих линейные тектонические зоны. Согласно имеющимся методическим разработкам (Симонов, 1999; Философов, 1975), деление территории при этом начиналось с анализа местоположения эрозионных долин самого высокого порядка. Они определяют положение главных линеаментов-блокоразделов, имеющих наивысший ранг. Для этого долина наиболее высокого порядка прослеживалась до узла слияния двух долин более низкого порядка (порядок долины определялся по Хортон-системе). Для трассирования главного линеамента-блокораздела выше узла слияния из этих двух однопорядковых водотоков выбирался тот, который являлся прямым продолжением главного. Следуя этому правилу, граница проводилась по долинам все более низких порядков до тех пор, пока главные линеаменты-блокоразделы смежных эрозионных систем, соединившись, не пересекут водоразделы или не выйдут за пределы изучаемой территории, разделив ее на несколько частей, т.е. блоков самого высокого ранга. В пределах каждого из этих блоков проводились линеаменты-блокоразделы следующего ранга. Таким же образом выделялись границы блоков всех остальных рангов.

Положение линеаментов-блокочаделов для их соединения на водоразделах определялось в каждом конкретном случае особо. Трудностей при этом не возникало, когда линеаменты выходили на ложбину, седловину, ущелье или по простиранию трассировались топографическим уступом. Если же линеаменты упирались в слабо расчлененные или платообразные поверхности, что в условиях горных массивов Хибин и Ловозера бывает часто, то для определения их положения привлекались данные дешифрирования дистанционных материалов (топокарт, космо- и аэроснимков) и полевых наблюдений в виде косвенных (ландшафтных) признаков, например, характер растительности, изменения грунтов, микрорельеф, повышенная трещиноватость пород и т.п.

Поскольку установлено, что эрозионные системы Кольского полуострова представлены долинами семи порядков, то, исходя из этого, морфометрическими методами здесь возможно выделение морфотектонических структур семи рангов. Границы блоков первого (наивысшего) ранга, представляющие собой более или менее широкие зоны (от нескольких десятков до нескольких сотен метров), определялись по эрозионным долинам наиболее высокого порядка. В соответствии с порядком линеамента-блокочадела проводились границы структур и более низких рангов. При выделении наиболее мелких блоков (пятого, шестого и седьмого рангов), выполненном для реперных районов, учитывались самые мелкие эрозионные формы и морфологические элементы рельефа, представленные уступами, перегибами склонов. В этом случае результаты определения границ были протестированы в полевых условиях по многочисленным косвенным признакам.

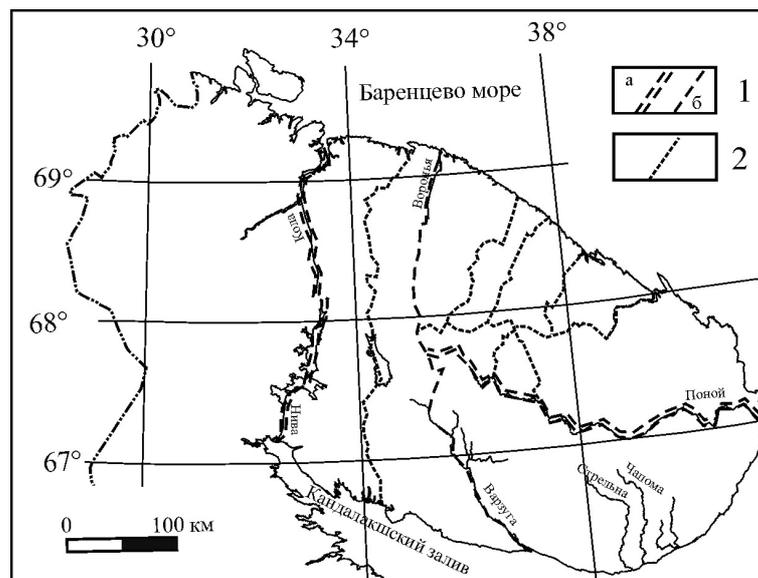
3. Блочные структуры Кольского полуострова, выделенные по результатам морфометрического анализа рельефа

По морфометрическим данным на Кольском полуострове представлены три морфотектонических блока (западный, северный и южный), относимых к наивысшему (первому) рангу (рис. 1). Западный блок ограничен долинами рек Кола и Нива, которые отделяют собственно полуостров от материковой части Кольского региона на западе, и предположительно долинами рек Варзуга и Воронья. Северный и южный блоки разделены линеаментом, который спрямленными своими участками трассирует долина реки Поной. Эти блоки имеют удлиненную форму в плане. Длинная ось западного блока отличается от остальных блоков субмеридиональным простиранием. Каждый из них состоит из секций, которые являются в данном случае блоками второго порядка. Эти морфотектонические структуры в западном блоке также вытянуты субмеридионально, в южном блоке они отсутствуют, а в северном представляют собой изометричные структуры разной площади. Существует мнение, что удлиненные блоки сопряжены с наиболее мощным тектоническим нарушениями, имеющими обычно признаки сдвига, а изометричные образуют ядра устойчивых частей тектонических структур (Симонов, 1999).

Наиболее высокое положение в современном рельефе (превышающее 1000 м н.у.м.) занимает западный блок, в центре которого находятся среднегорные массивы Хибин, Ловозера, а также Кандалакшские и Колвицкие Тундры на южном его крыле. Несколько ниже южный блок, причем, наиболее высокий он на западе, где расположены Панские Тундры (наибольшая высота 629 м). Северный блок среди крупнейших региональных морфотектонических структур отличается самым низким гипсометрическим положением, не превышающим 400-450 м н.у.м.

Рис. 1. Крупнейшие блоковые структуры Кольского полуострова

Условными знаками показаны линеаменты-блокочаделы:
1 – первого ранга
а – установленные по эрозионным долинам,
б – предполагаемые;
2 – второго ранга



3.1. Блоковые структуры реперных районов – горных массивов Хибин и Ловозеро

В пределах горного массива Хибин установлено, что эрозионные системы представлены здесь долинами пяти наиболее низких порядков, в массиве Ловозеро – четырех. Исходя из этого, посредством применяемой методики в Хибинах возможно выделение морфотектонических структур пяти рангов (рис. 2), в Ловозерском – четырех (рис. 3). Как указывалось, границы и ранг блоковых структур определяются в первую очередь порядком эрозионной долины. В региональной 7-уровневой иерархии блоков эрозионные долины пятого порядка (по Хортон-системе) соответствуют линеамент-блокораздам третьего ранга. Долины четвертого, третьего, второго и первого порядков соответственно трассируют линеаменты четвертого, пятого, шестого и седьмого рангов. При выделении наиболее мелких блоков (пятого, шестого, и седьмого рангов) формальный подход с использованием только морфометрических методов потребовал полевой верификации границ-линеаментов для определения их ландшафтных и геологических индикаторов.

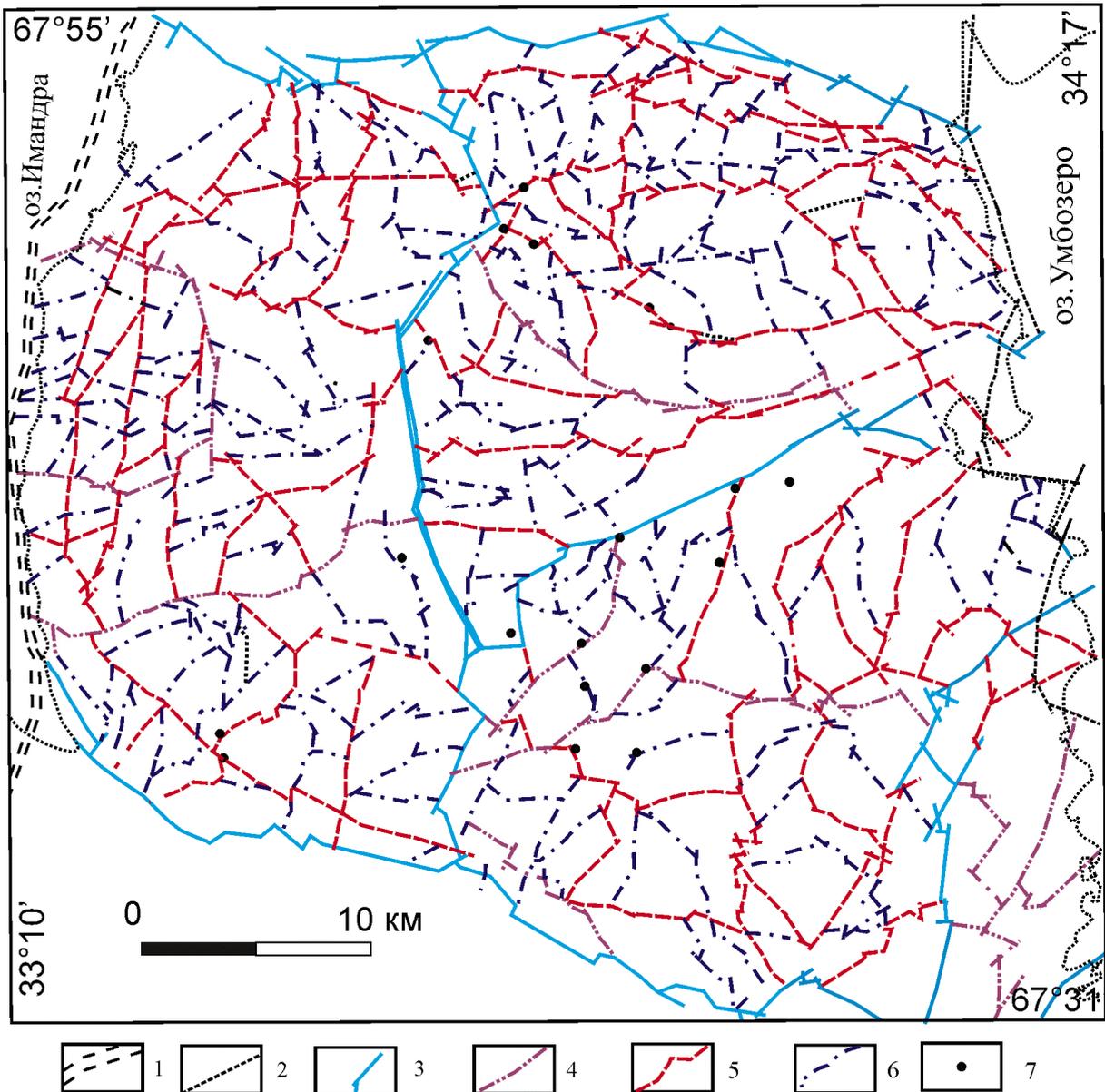


Рис. 2. Схема блоковых структур горного массива Хибин (без наиболее мелких линеаментов-блокоразделов, т.е. без линеаментов 7 ранга).

Условными знаками показаны:

1-6 – линеаменты-блокоразделы соответствующего ранга;

7 – местоположение некоторых известных проявлений линейной коры выветривания.

4. Ландшафтные и геологические признаки блокораздельных зон

В приповерхностной части земной коры и на поверхности линеаменты-блокоразделы обладают признаками, которые проявляются в измененных выветриванием породах, в особых ландшафтных компонентах.

Геологические признаки блокораздельных зон выражены линейными корами выветривания и подвергнутыми выветриванию доледниковыми образованиями: глинами, трещиноватыми измененными, обычно шпрудштейнизированными, коренными породами, в которых отмечается появление вторичных минералов (гидрослюда, нонтронита, гидрогематита, лимонита, халцедона, анатаза), брекчиями, конгломератами, гравелитами. Линейные коры выветривания и измененные доледниковые отложения, установленные ранее при проведении широкомасштабных разведочных работ (Арманд, 1964; Сидоренко, Галахов, 1957), встречаются в обнажениях и вскрыты бурением на разных глубинах по речным долинам, ущельям, ложбинам, седловинам, перевалам на водоразделах (рис. 2). Их известные проявления пространственно совпадают с линеаменами-блокоразделами, а их положение определяет развитие многих, возможно, большинства отрицательных форм рельефа Хибин. Связь отрицательных форм рельефа с трещиноватостью щелочных пород через промежуточные звенья разрушенных зон и линейной коры выветривания неоднократно отмечалось многими исследователями (Ramsay, Hackman, 1894; Арманд, 1964).

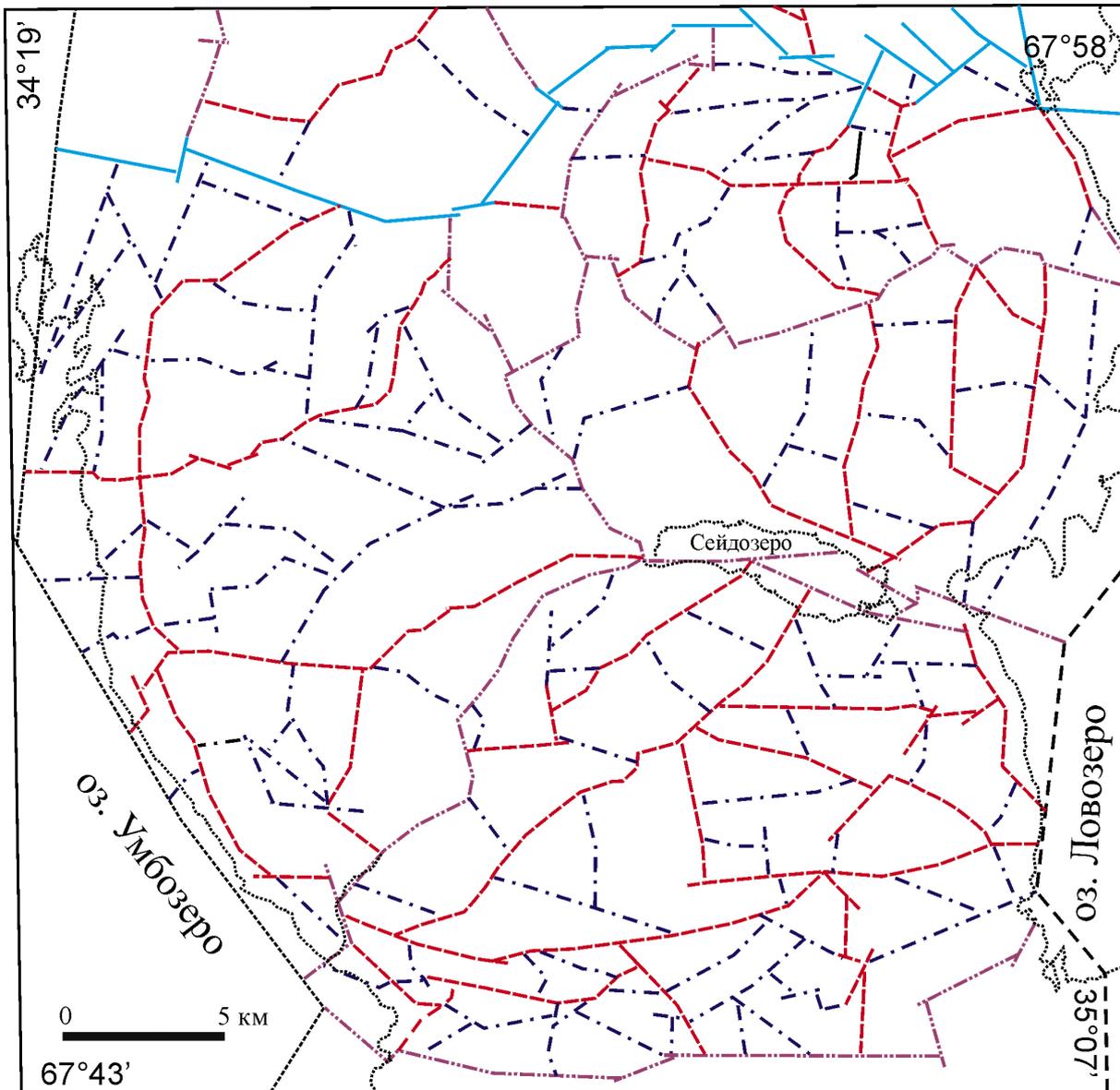


Рис. 3. Схема блоковых структур горного массива Ловозеро (без линеаментов-блокоразделов 7 ранга).
Условные знаки показаны на рис. 2.



Рис. 4. Ландшафтные признаки блокораздельных зон, выраженные в особенностях рельефа и грунтов:
 а – ущелья и зияющие трещины, б – малоамплитудные уступы топографической поверхности;
 в – полосы повышенного дробления пород; г – мерзлотные формы рельефа, пространственно совпадающие с зонами повышенного дробления пород

Ландшафтные признаки блокораздельных зон разнообразно выражены на поверхности. В каждом случае линеаменты-блокоразделы, выделенные морфометрическими методами при анализе дистанционных материалов, на местности имели те или иные ландшафтные признаки. Конечно, в первую очередь к ним относятся эрозионные долины, которые собственно и трассируют линеаменты. На водоразделах, особенно на платообразных поверхностях Хибин и Ловозера, ландшафтные индикаторы блокораздельных зон, установленные в ходе полевых исследований, наиболее очевидно проявляются в виде отрицательных структурных форм и элементов рельефа – ущелий (рис. 4а), трещин и малоамплитудных уступов топографической поверхности (рис. 4б). Как правило, такие индикаторы характерны для блокоразделов наиболее низкого, т.е. седьмого ранга. Для блокораздельных зон более высоких рангов такие структурные формы подчеркнуты и другими ландшафтными признаками. Это ледниковые цирки и кары (многие ледниковые формы Хибин и Ловозера развиваются по зонам разрушенных пород); линейно ориентированные полосы повышенного дробления пород, установленные на платообразных водоразделах (рис. 4в); пространственно совпадающие с ними мерзлотные формы рельефа – формы полосной солифлюкции (рис. 4г); выходы грунтовых вод на перевалах и вдоль склонов хребтов, по днищам ущелий (рис. 5а); современные ледники и снежники, которые образуются не только в древних ледниковых цирках, но и в молодых трещинах, трассирующих линеаменты-блокоразделы (рис. 5б); линейная локализация почв и растительности на платообразных водоразделах (рис. 5в).

5. Тектонические движения и прочностные свойства пород, их морфологическая выраженность в поле абсолютных высот

Современное высотное положение в рельефе блока любого ранга характеризуется положением объемлющей вершинной поверхности и в самом первом приближении может свидетельствовать об интенсивности относительного поднятия соответствующих блоков, т.е. современное распределение абсолютных высот рельефа суммарно отражает неравномерность вертикальных поднятий на неотектоническом этапе развития региона. В пределах Кольского полуострова инструментальными методами установлено современное тектоническое поднятие с максимальной интенсивностью в районе Хибин и Ловозера (2-4 мм/год), а также на побережье Кандалакшского залива (Никонов, 1977).

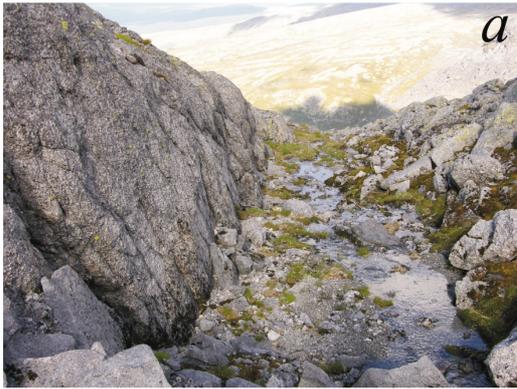


Рис. 5. Ландшафтные признаки блокораздельных зон, выраженные в особенностях, почв, вод и растительности:

- а – выходы грунтовых вод по днищам и склонам ущелий;
- б – снежники в наиболее молодых грабенах;
- в – линейно ориентированные полосы почв и растительности

Степень пространственной деформации дневной поверхности (поля абсолютных высот рельефа, где поле – это часть пространства, в котором рассматриваются явления) вследствие ее тектонического воздымания отражают условные амплитуды вертикальных движений (рис. 6), которые можно определить морфометрическими методами как разность между положением однопорядковых вершинной и базисной поверхностей рельефа. Вершинная поверхность представляет собой объемлющую поверхность, касательную к водораздельным линиям, базисная – к эрозионным линиям водотоков. Разность между вершинной и базисной поверхностями отражает совокупное влияние всех геодинамических процессов. Эндегенная составляющая в этом случае занижена по сравнению с истинным значением, чем объясняется условность в оценке амплитуд вертикальных перемещений.

Однако деформация дневной поверхности обусловлена не только тектоническими движениями, но и зависит от прочностных свойств пород, определяющих их разную устойчивость к процессам денудации. В качестве показателя устойчивости горных пород использовался коэффициент крепости пород по М.М. Протодяконову (*Минеральное сырье...*, 1997), установленный экспериментально и рекомендуемый для оценки прочностных свойств пород в структурно-геоморфологических исследованиях. Породы кристаллического фундамента Кольского региона имеют коэффициент крепости от 3-4 до 16-20 и являются породами высшей степени крепости, очень крепкими, крепкими и довольно крепкими. Основой для их разделения на группы служила Геологическая карта Кольского региона (*Геологическая карта*, 2001).

Ранее в зависимости от распределения абсолютных высот поверхности в Кольском регионе были выделены разноранговые морфологические структуры, т.е. формы рельефа (Корсакова, 2002). Сопоставление их с вещественно-формационными структурами Кольского полуострова показало, что они несогласны в своем пространственном положении. Так, для единой региональной морфологической структуры, образованной горными массивами Хибини и Ловозеро, разделяющей их долиной оз. Умбозеро и прилегающими предгорьями (рис. 6), было установлено частичное совпадение морфологических и геологических границ при обратном соотношении между вещественно-формационными и морфологическими структурами. В этом случае в условиях преобладающей денудации, присущих региону в целом, наблюдается инверсия в соотношении прочностных свойств пород и степени их выраженности в рельефе. Так, в центральной части Кольского региона наиболее прочные породы (нориты, габбро-нориты, порфириды, диабазы) вскрыты на более низких высотных уровнях, тогда как средние по прочности породы (нефелиновые сиениты) образуют наиболее высокие положительные формы рельефа.

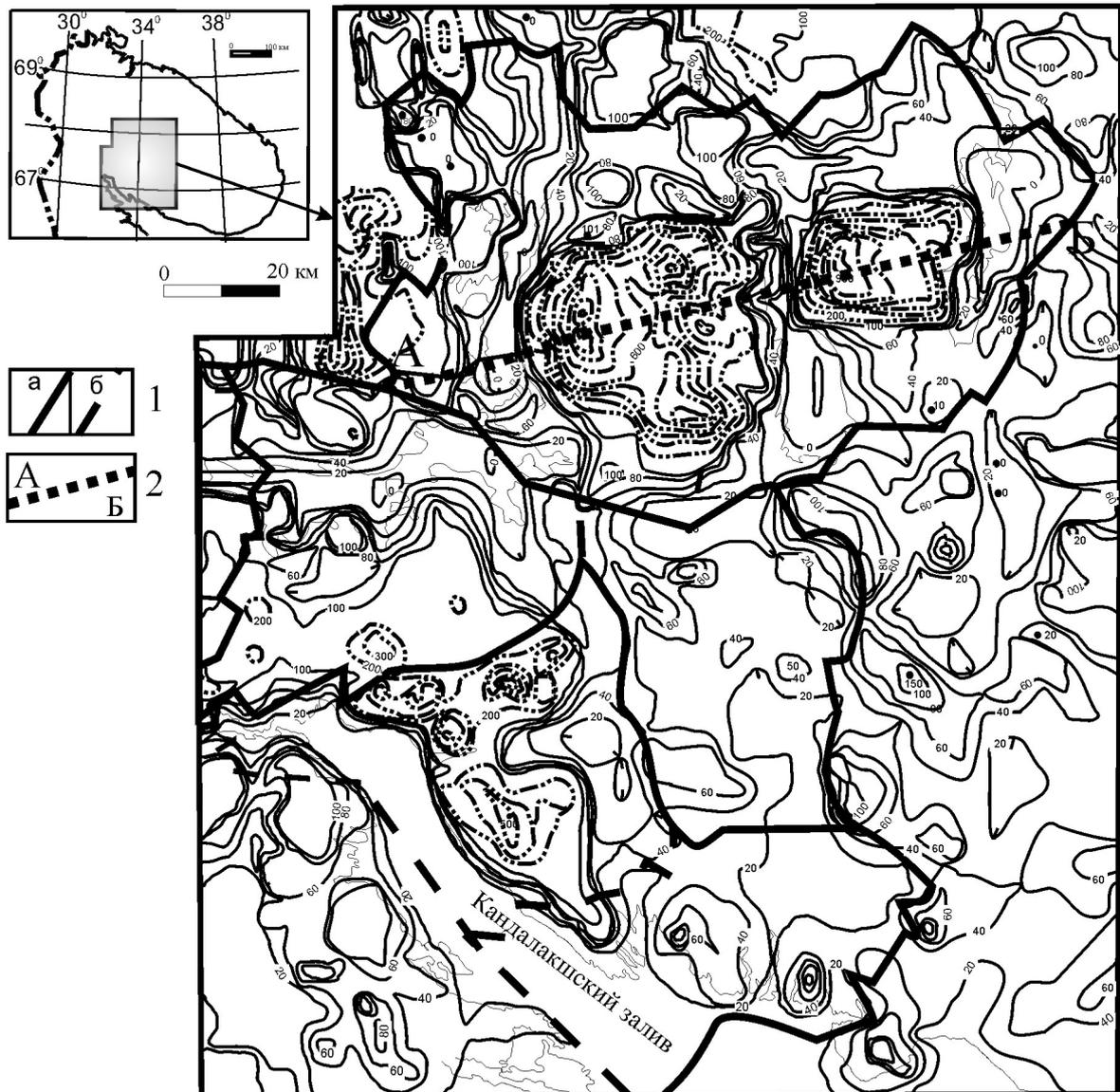


Рис. 6. Упрощенная схема крупных морфологических структур (форм рельефа) и условных неотектонических амплитуд, установленных морфометрическими методами для центральной части Кольского региона.

Условными знаками показаны: 1 – морфологические границы (а – I, б – II порядков); 2 – положение линии профиля, вдоль которого проводилось численное моделирование напряженного состояния пород.

Изолинии условных амплитуд проведены через 20 м при их значениях до 100 м (сплошные линии) и через 100 м при более высоких значениях (штрихпунктирные линии).

Очевидные результаты такого сопоставления позволяют считать морфологические структуры регионального ранга активными, т.е. созданными за счет взаимодействия эндогенных и экзогенных факторов при восходящем типе развития рельефа, когда тектонические процессы (восходящие движения) преобладают над денудационными. Поэтому было установлено, что в Кольском регионе максимальные геодинамические деформации (условные их амплитуды достигают 1000 м) характерны для гористого рельефа, наименьшим деформациям, с амплитудами всего до 100 м, соответствуют низменности, а при возвышенном рельефе отмечаются средние их значения с условными амплитудами, не превышающими 400 м.

Горизонтальная компонента тектонических движений в основном проявляется в перераспределении напряжений внутри массивов горных пород. Более ранними исследованиями (Булин, Марков, 1977) было установлено, что причины современной напряженности массивов горных пород не зависят от их возраста, их следует искать в проявлениях современных глобальных и региональных процессов.

6. Математическое моделирование напряженного состояния пород в условиях гористого рельефа

Для исследования закономерностей распределения напряжений был рассмотрен вертикальный разрез, пересекающий уже упоминавшуюся единую региональную морфологическую структуру (рис. 6), в которую входят горные массивы Хибин и Ловозеро, разделяющая их долина оз. Умбозеро и прилегающие к ним предгорья. Предполагалось, что морфологическая структура вмещает однородные, изотропные породы с механическими свойствами (удельный вес, модуль Юнга, коэффициент Пуассона), отражающими свойства наиболее распространенных пород горных массивов Хибин и Ловозеро и прилегающих равнин. Посредством математического моделирования определялись горизонтальные (σ_x) и вертикальные (σ_y) напряжения.

Решение задач математического моделирования напряженного состояния пород в горном массиве, осуществляемое методом граничных элементов, предполагало три типа граничных условий: 1) действие только гравитационных сил; 2) действие на "бесконечности" равномерно распределенных по глубине горизонтальных сжимающих тектонических сил, вызванных движением литосферных плит; 3) совместное действие гравитационных и тектонических сил.

В результате было установлено, что в условиях действия гравитационных сил горизонтальные напряжения (рис. 7а, правая сторона) на некоторой глубине H , которая приблизительно равна удвоенной относительной высоте рельефа и более (относительная высота (h) – превышение положительных элементов рельефа над отрицательными), начинают отвечать закономерности:

$$\sigma_x = \lambda \gamma y,$$

где σ_x – значение горизонтального напряжения; λ – коэффициент бокового отпора горных пород, возникающего из-за невозможности деформирования массива в горизонтальном направлении, равный $v / 1-v$ (v – коэффициент Пуассона) (при $v = 0.25$ значение $\lambda = 1/3$); γ – удельный вес горных пород; y – расстояние от дневной поверхности по вертикали.

Следует заметить, что вблизи дневной поверхности под долинами и на склонах гор горизонтальные напряжения являются растягивающими, по значению близкими к нулю (около $0.4 \gamma h$). В пределах же нагорных участков горизонтальные напряжения являются сжимающими, и у дневной поверхности их значение по величине меньше, чем установленное для более глубоких горизонтов, т.е. меньше, чем $\lambda \gamma y$.

Распределение вертикальных напряжений (рис. 7а, левая сторона) в условиях действия гравитационных сил отвечает закономерности:

$$\sigma_y = \gamma y.$$

Причем вблизи дневной поверхности под долинами вертикальное напряжение на 1-2 % больше, а в пределах нагорных участков на 1-2 % меньше, чем γy . На глубине, равной удвоенному значению относительной высоты рельефа, эта разница уже не отмечается. В целом, можно отметить, что зависимость и горизонтальных, и вертикальных напряжений от рельефа в условиях действия только гравитационных сил незначительна.

Более существенное влияние на распределение напряжений обусловлено тектоническими силами, вызванными взаимодействием литосферных плит. Расчетным путем установлено, что в рассматриваемых условиях, т.е. в условиях действия на "бесконечности" горизонтальных тектонических равномерно распределенных по глубине сжимающих напряжений T , равных -40 Мпа (отрицательное значение означает сжатие), величина концентрации горизонтальных напряжений (рис. 7б, правая сторона) зависит от радиуса кривизны поверхности (Марков, Савченко, 1984). Горизонтальные напряжения вблизи дневной поверхности под долинами оказались большими по значению, чем действующие на "бесконечности", а в нагорных участках – меньшими.

Влияние тектонических сил, связанных с движением литосферных плит, сказывается на вертикальных напряжениях (рис. 7б, левая сторона) таким образом, что их значение составляет 10-40 % от действующих на "бесконечности". При этом под долинами вертикальные напряжения сжимающие, а в нагорных участках – растягивающие (на рис. 7б показаны пунктирными линиями), и распространяются достаточно глубоко (до удвоенной относительной высоты рельефа и более).

В условиях совместного действия гравитационных и тектонических сил вертикальные напряжения под долинами могут оказаться больше, чем установленные их значения для условий, когда действует только гравитационные силы, т.е. больше γy . В нагорных участках при этом значение вертикальных напряжений, наоборот, значительно меньше, чем γy . Эффекты уменьшения вертикальных напряжений в нагорных участках и их увеличения под долинами от действия и гравитационных, и тектонических сил складываются, т.е. совместное действие гравитационных и горизонтально ориентированных тектонических сил приводит к взаимному относительно друг друга поднятию и

опусканию блоков, когда долинные участки "погружаются", а междуречные "всплывают" на фоне общих восходящих движений земной коры, свойственных для северо-восточной части Балтийского щита.

Все эти напряжения, в конечном счете, реализуясь на поверхности, и определяют упорядоченную блочную структуру региона, выраженную в поле абсолютных высот рельефа.

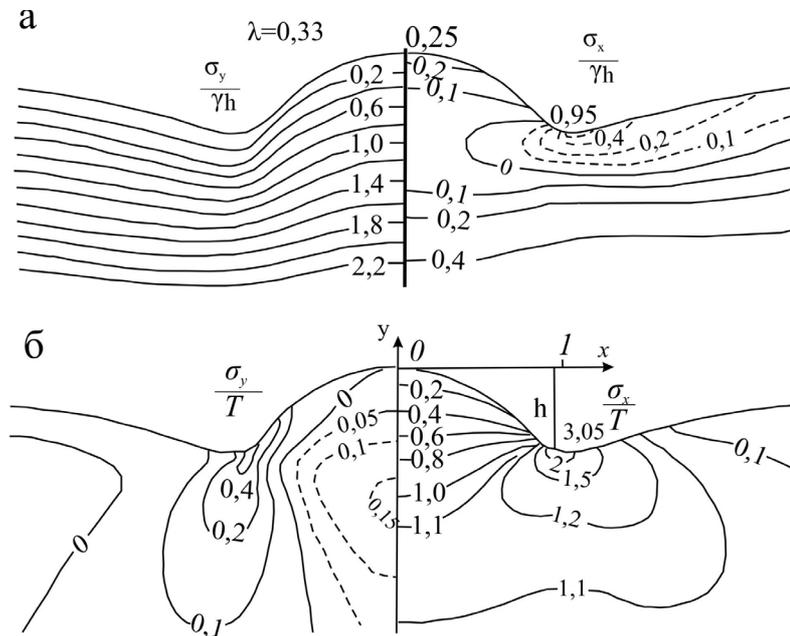


Рис. 7. Распределение относительных напряжений в гористом массиве при действии сил: гравитационных (а) и горизонтальных тектонических (б). Левая сторона – вертикальные, правая – горизонтальные напряжения. Изолиниями показаны значения напряжений: сплошными – сжимающих, пунктирными – растягивающих;

$\sigma_x/\gamma h$ – горизонтальные и $\sigma_y/\gamma h$ – вертикальные напряжения при действии гравитационных сил;

σ_x/T – горизонтальные и σ_y/T – вертикальные напряжения при действии тектонических сил;

y – вертикальная и x – горизонтальная координаты, h – максимальная относительная высота рельефа; значение $\lambda = 0,33$ (коэффициент бокового отпора горных пород, возникающего из-за невозможности деформаций в горизонтальном направлении) получено при $\nu = 0,25$, где ν – коэффициент Пуассона.

7. Устойчивость структурных форм горного массива Хибин и Ловозеро

Многочисленные исследования разломной, трещинной тектоники и напряженности пород горных массивов Ловозеро и особенно Хибин (Онохин, 1975; Марков, Савченко, 1984) указывают на неоднородность поля тектонических напряжений. Формирование этой неоднородности – процесс полигенетический. Выделив два ведущих фактора (наличие горизонтальных тектонических напряжений на границах блоковых структур, обусловленное современными движениями литосферных плит, и сопротивление этому влиянию пород, обладающих разной устойчивостью в зависимости от своих упругих и других свойств), которые контролируют структурообразование в верхней части земной коры, ограничимся качественной оценкой результата их взаимодействия.

Постепенное накопление напряжений и релаксация напряженного состояния блоков обусловлена как естественными геологическими процессами развития земной коры, так и хозяйственной деятельностью, связанной с разработкой месторождений полезных ископаемых, строительством. Поэтому от пространственного положения горных выработок, рудников, карьеров по отношению к границам разноранговых блоков зависит устойчивость природно-технических систем. Исходя из теоретических системных свойств, чем выше ранг блокораздела, тем более он стабилен в иерархически построенной системе. Проявления техногенной трансформации упругих свойств массивов горных пород следует ожидать в изменении или образовании наименее консервативных элементов системы блоковых структур. Исходя из этих рассуждений, чем ниже ранг ограничивающей блок тектонической зоны (линеамента-блокораздела), тем меньшее внешнее воздействие необходимо для концентрации и последующей разрядки напряжений в окрестностях этого блокораздела, тем менее стабильно пространственное положение ограниченного им блока.

Вблизи границ блоков, представляющих собой разломные зоны, в наибольшей степени проявляется концентрация напряжений. Именно здесь создаются наибольшие градиенты изменения естественных напряжений, вызванных взаимодействием внешних (движения литосферных плит) и внутренних (упругие свойства массива пород) факторов и формируются потенциально опасные участки. Измерения, проведенные в различных точках земного шара (в Скандинавии, Ирландии, Канаде, Африке и др.), в том числе и в Хибинах и Ловозере, зафиксировали наличие горизонтальных сжимающих напряжений в массивах горных пород (Кропоткин, 1977; Сейсмичность..., 2002). Эти напряжения в несколько раз превышают таковые, обусловленные действием гравитационных сил.

Изменение прочности и объемов пород вследствие разработки полезных ископаемых также нарушает устойчивость массивов горных пород в условиях действия внешних сил и тем самым приводит к перераспределению напряжений и изменению блоковой структуры этих массивов. Например, в результате разработки месторождений Хибин безвозвратно изымаются до 50 млн т/год полезных ископаемых и до 160 млн т/год перемещаются из мест коренного залегания в места складирования (Сейсмичность..., 2002). В условиях скоротечности этот процесс проявляется землетрясениями, а в природно-технических системах и в виде горных ударов, стрельяния пород и т.п. В последнем случае быструю релаксацию напряжений провоцирует и технологическое применение массовых взрывов (до 350 т тротил-эквивалента) при разработке полезных ископаемых.

Пространственная зависимость эрозионных долин от положения зон общей трещиноватости массива пород позволяет подойти к определению напряженного состояния разноранговых блоков по ориентации долин, трассирующих блокоразделы наивысших рангов. Исходя из этого, направление преобладающих тектонических напряжений, определенное по простиранию блокоразделов наивысших рангов, которые трассируются долинами высоких порядков, – северо-северо-восточное (рис. 8). Блокразделы низких рангов, которые трассируются небольшими долинами и ложбинами, отличаются большим разбросом направлений их простирания с незначительным преобладанием запад-северо-западного. Здесь, видимо, происходит перераспределение направлений напряжений, связанное с внутренним строением массива горных пород и согласующееся с многочисленными границами более низкого ранга.

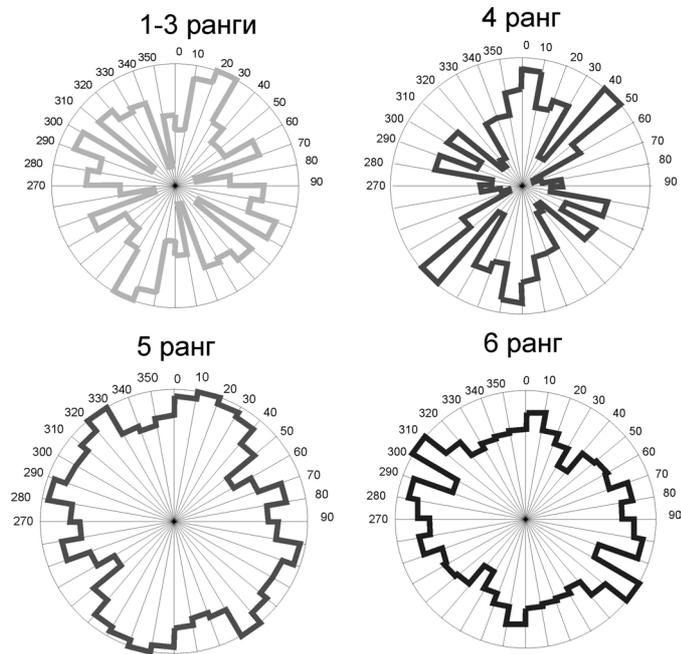


Рис. 8. Полярные диаграммы простираний линеаментов-блокоразделов разного ранга в пределах горного массива Хибин

Установленные в результате математического моделирования закономерности распределения напряжений внутри массива горных пород свидетельствуют о том, что ниже уровня дна долин (ниже базисной поверхности рельефа) горизонтальные тектонические напряжения концентрируются под дном долин. В нагорных участках они уменьшаются по сравнению с действующими на "бесконечности" горизонтальными тектоническими напряжениями. При этом в пределах выступов рельефа вертикальные тектонические напряжения растягивающие, а под долинами – сжимающие. Ориентировка линеаментов-блокоразделов, которые трассируются хорошо разработанными долинами (линеаменты первого и второго рангов), в целом совпадает с направлением сжимающих напряжений, тогда как направление растягивающих напряжений перпендикулярно к простиранию границ-блокоразделов. Это в целом согласуется с результатами морфоструктурного анализа (Авенариус и др., 1998), показавшего, что морфологию рельефа в Мурманском регионе предопределило новейшее надвигание в юго-западном направлении, и здесь наряду с надвигами по линии Карпинского отмечаются крупнейшие новейшие сдвиги и сбросо-сдвиги по другим разломным зонам. Также это означает, что последствия от релаксации напряжений в результате техногенных процессов будут более значительными в массиве пород, расположенном ниже базисной поверхности (рис. 9), где следует ожидать избыток горного давления.

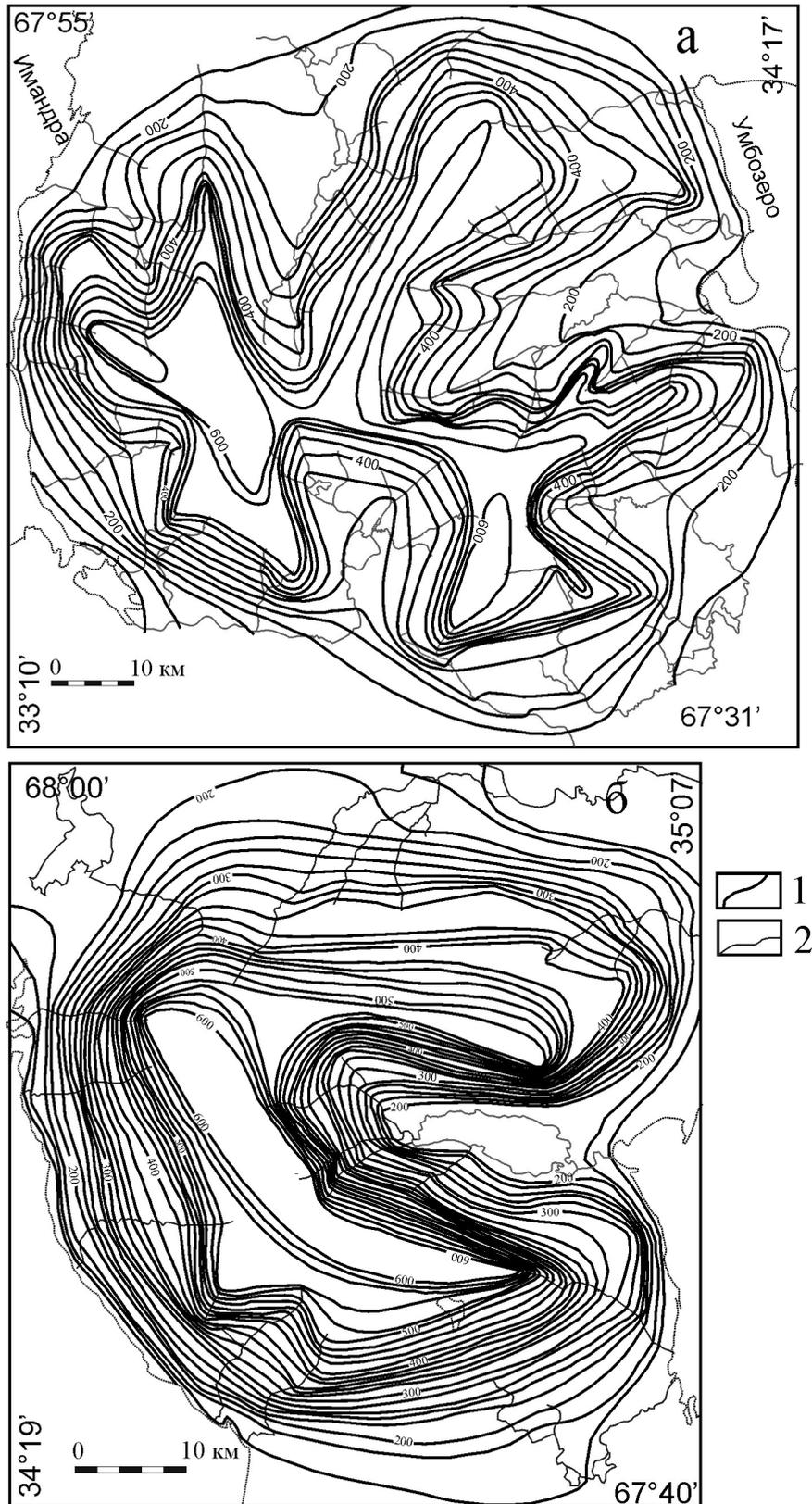


Рис. 9. Базисная поверхность рельефа в пределах горного массива Хибин (а) и Ловозеро (б), построенная согласно общепринятым морфометрическим методам (Симонов, 1996; Философов, 1975) по эрозионным долинам 2-4 порядков на основе среднемасштабных топокарт (составлена Захарченко Е.В.). Условными знаками показаны: 1 – тальвеги долин; 2 – изобазиты

8. Заключение

Исследования блокового строения приповерхностной части земной коры, проведенные для Кольского полуострова в целом и для реперных районов в пределах горных массивов Хибин и Ловозеро, выполненные на основе морфологического и морфометрического анализа рельефа с привлечением численного моделирования напряженного состояния пород, позволили сделать следующие выводы:

1. Морфометрическими методами установлено, что в приповерхностной части земной коры, слагающей Кольский полуостров, ее морфотектоническая структура образована иерархичной системой блоков. Границы блоков, спроецированные на поверхности, трассируются в первую очередь отрицательными формами рельефа и представлены линеаментами-блокоразделами семи рангов, а в пределах наиболее активных структур Хибин и Ловозеро, соответственно, пяти и четырех наиболее низких рангов.

2. Вертикальное поднятие и блоковое строение Кольского региона в целом и доминирующих в современном рельефе горных массивов Хибин и Ловозеро в частности представлены следствием горизонтального сжатия, возникающего в результате сопротивления континентальной литосферы края Восточно-Европейской платформы спредингу в соседних океанах. Величину поднятия можно приблизительно оценить, опираясь на анализ пространственного положения современной топографической поверхности, в виде условных амплитуд поднятия. На Кольском полуострове они достигают 1000 м.

3. Для единой крупной морфологической структуры регионального ранга – Хибино-Ловозерского среднегорного массива установлено частичное совпадение морфологических и геологических границ, отражающее обратное соотношение между положением вещественно-формационных структур и образуемых ими форм рельефа. В этом случае наблюдается инверсия в соотношении литоморфных свойств пород и степени их выраженности в рельефе, когда наиболее прочные породы вскрыты на более низких гипсометрических уровнях, а средние по прочности породы (нефелиновые сиениты) образуют высокие положительные формы рельефа.

4. Сопоставление установленных морфологических границ и геологических контуров позволяет считать морфологические структуры активными, созданными за счет взаимодействия эндогенных и экзогенных факторов при восходящем типе развития рельефа, т.е. при преобладании тектонических процессов (восходящих движений) над денудационными. Восходящие движения, характерные для Кольского полуострова в целом и особенно для горных массивов Хибин и Ловозеро на протяжении мезо-кайнозойского этапа развития региона, обеспечивают частичное освобождение от горизонтального сжатия, действующего на глубине, и растяжение (расширение) поднимающихся масс. В области гипергенеза (на контакте литосферы, атмосферы и гидросферы) это проявляется раскрытием разномасштабных вертикальных трещин, образованием тонкой расслоенности пород, т.е. появлением разломных зон в виде ослабленных разрыхленных пород, которые на поверхности выступают в качестве линементов-блокоразделов в виде разнообразных отрицательных форм рельефа. В первую очередь они наследуются долинами разнопорядковых водотоков. Речные долины посредством избирательной эрозии закладываются по зонам тектонических нарушений – зонам ослабленных пород, где отмечается нарушение их сплошности. Их положение за пределами эрозионных долин подчеркнуто склоновыми процессами, почвообразованием, повышенной за счет подземных вод увлажненностью пород, что способствует появлению здесь особых, более влаголюбивых растительных сообществ и линейно ориентированных пятен почв и растительности.

5. Неровности рельефа, которые образуются в результате сложного взаимодействия внешних (движения литосферных плит) и внутренних (проявления упругих свойств массивов пород) геодинамических процессов, в свою очередь, влияют на перераспределение напряжений внутри массивов горных пород. Вблизи дневной поверхности под долинами отмечается концентрация горизонтальных напряжений, обусловленных рельефом при воздействии тектонических сил, а в нагорных участках их ослабление по сравнению с действием этих тектонических сил. Распределение вертикальных напряжений в этом случае характеризуется тем, что под долинами они сжимающие, а в нагорных участках – растягивающие, и распространяются достаточно глубоко (до удвоенной высоты рельефа и более). В условиях совместного действия гравитационных (влияние рельефа) и тектонических горизонтальных сил (влияние движения литосферных плит) отмечается взаимное относительно друг друга поднятие и опускание блоков, когда долинные участки как бы "погружаются", а междуречные "всплывают" на фоне общих восходящих движений земной коры, свойственных для северо-восточной части Балтийского щита.

6. Устойчивость блоковых структурных форм определяется тектоническим сжатием на глубине и расширением при поднятии блоков, а в условиях природно-техногенных систем и нарушением гравитационного баланса в результате разработки полезных ископаемых. При этом последствия от перераспределения напряжений в виде роста горного давления более значительны в массивах пород, расположенных ниже базисной поверхности рельефа.

Благодарности. Авторы признательны рецензенту Д.В. Жирову за внимательное прочтение статьи и полезные замечания, которые позволили внести важные уточнения, изменения и разъяснения в наиболее спорные формулировки и утверждения, которые обязательно появляются, когда имеет место разный подход к проблеме.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Мурманской области (грант 05-05-97501-р_север_а).

Литература

- Ramsay W., Hackman V.** Das Nephelinsyenit-gebiet auf der Halbinsel Kola, 1. *Fennia*, 11, № 2, 1894.
- Авенариус И.Г., Белозеров С.Н., Львова Л.Л., Ренкина Т.Ю.** Некоторые вопросы геодинамики южной части Баренцева моря. *Тезисы докладов Всеросс. совещания "Главнейшие итоги в изучении четвертичного периода и основные направления исследований в XXI веке" 14-19 сентября 1998 г., Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, СПб., с.186, 1998.*
- Арманд А.Д.** Развитие рельефа Хибин и прихибинской равнины. *Апатиты, Геологический институт КФ АН СССР, 244 с., 1964. Деп. в ВИНТИ 08.04. 1965 г., № 32-64.*
- Белоусов В.В.** Основы геодинамики. *М., Недра, 246 с., 1975.*
- Булин Н.К., Марков Т.А.** К вопросу о зависимости напряженного состояния массивов горных пород от их геологического возраста. *Отражение современных полей напряжений и свойств пород в состоянии скальных массивов. Апатиты, КФ АН СССР, с.38, 1977.*
- Геологическая карта Кольского региона (северо-восточная часть Балтийского щита). *Ред. Ф.П. Митрофанов, Апатиты, Геологический институт КНЦ РАН, 2001.*
- Каспарьян Э.В., Яковлев С.Ю., Шумилов П.А.** Компьютерный расчет параметров геомеханических моделей горных выработок для целей мониторинга состояния массивов окружающих горных пород. *В кн.: Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых и освоения подземного пространства Северо-запада России, часть 3. Материалы международной научной конференции, посвященной 275-летию образования Российской академии наук, 23-25 марта 1999 г., Апатиты, КНЦ РАН, с.55-61, 2001.*
- Корсакова О.П.** Морфологическая систематика рельефа северо-восточной части Балтийского щита. *Геоморфология, № 3, с 87-95, 2002.*
- Космическая информация в геологии. *М., Наука, 536 с., 1983.*
- Кропоткин П.Н.** Напряженное состояние земной коры и тектонические разломы. *В кн.: Разломы земной коры. М., Наука, с.20-29, 1977.*
- Марков Г.А., Савченко С.Н.** Напряженное состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа. *Л., Наука, 140 с., 1984.*
- Минеральное сырье. Общие понятия. *Справочник. М., ЗАО "Геоинформмарк", 69 с., 1997.*
- Никонов А.А.** Голоценовые и современные движения земной коры. *М., Наука, 240 с., 1977.*
- Онохин Ф.М.** Особенности структуры Хибинского массива и апатито-нефелиновых месторождений. *Л., Наука, 106 с., 1975.*
- Сейсмичность при горных работах. *Под ред. Н.Н. Мельникова. Апатиты, КНЦ РАН, 325 с., 2002.*
- Сидоренко А.В., Галахов А.В.** Доледниковые континентальные отложения в Хибинах и некоторые вопросы палеогеографии. *Доклады АН СССР, т.115, № 1, с.161-163, 1957.*
- Симонов Ю.Г.** Объяснительная морфометрия рельефа. *М., ГЕОС, 263 с., 1999.*
- Философов В.Л.** Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. *Саратов, изд. Саратовского ун-та, 232 с., 1975.*