УДК 271; 622

Г.М. Ерёмин

ТЕКТОНИКА ВЫБРОСА МАГМЫ И ПОСТМАГМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА И ОБРАЗОВАНИЕ БЛОЧНОСТИ ПОРОД И ИХ УЧЕТ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫРАБОТОК ОТКРЫТЫХ И ПОДЗЕМНЫХ РАБОТ

Приведены основные положения методологии выделения этапов начала тектоники рудогенеза и действия тектонических сил и процессов твердения и кристаллизации вещества магмы с действующими силами, различающимися на несколько порядков до испытания образцов типа керн со снятыми напряжениями и имеющими характеристики при твердении вещества (сцепление и угол внутреннего трения). Показаны способы учета и обеспечения устойчивости и безопасности поддержания выработок при проведении их при открытых и подземных работах в нарушенных массивах.

Ключевые слова: тектоника, рудогенез, магма, тектонические напряжения, кристаллизация, трещинообразование, устойчивость выработок, расчет их параметров.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-5-12

В настоящее время возникли серьезные проблемы в обеспечении устойчивости открытых и подземных выработок при проведении их в сложных горно-геологических условиях разработки месторождений открытым и подземным способами. Эти проблемы связаны с решением как некоторых задач теоретического характера, так и вопросов проектирования выработок с учетом длительного и устойчивого состояния в процессе разработки месторождений.

Как известно, любое проведение выработок в массиве вызывает перераспределение поля напряжений вокруг этой выработки или их части. Поэтому на первоначальном этапе важно знать, как характер распределения главных действующих напряжений на данном участке месторождения (рудного тела) на различных горизонтах, так и их величину. Особенно важно при этом учесть влияние тектонических напряжений на устойчивость выработок.

Большинство месторождений магматического характера (происхождения), очаг зарождений которых может находиться на значительной глубине (иногда до 2—3 км и более) [1, 2, 3], рис. 1, *а*, *б*.

Массивы пород, среди которых они образуются, могут также претерпевать различные изменения и превращения в течение десятков и сотен миллионов лет в процессе образования верхней

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 11. С. 5–12.
© Г.М. Ерёмин. 2017.

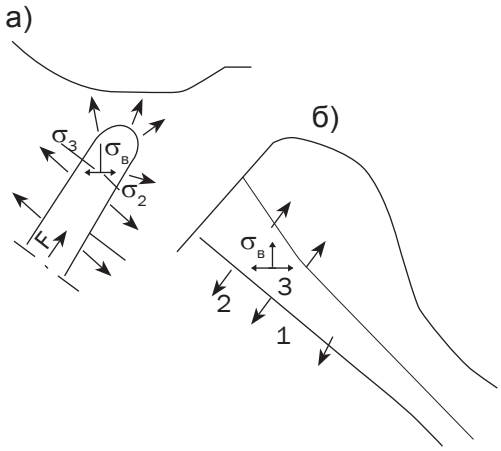

Рис. 1. Схема действия тектонических сил в период выброса магмы рудного вещества: крутопадающее (а) и наклонное (б) рудное тело, месторождение апатитовых руд «Плато Расвумчорр»; 1 — магма рудного вещества, 2 — тектонические силы, 3 — действующие напряжения при кристаллизации $\sigma_в$, $\sigma_2 = \sigma_3$

части раскаленной поверхности Земли, изобилующей очагами взрывного выброса продуктов переработки магмы и последующего образования коры твердения и выветривания.

В период образования месторождений в виде рудных тел круто-наклонно падающих и из их очага под громадным давлением выбрасывается масса длительно формирующегося и накапливающегося вещества, которое со временем человек признает как полезный компонент(ы) и присвоит название месторождение полезных ископаемых.

Выброс магматического вещества из очага его образования может происходить как в результате разрыва сформировавшихся трещин к этому времени, так и вновь образующейся под действием тектонических сил очага кратера (плутона), достигающих десятки и сотни миллионов мегапаскалей.

Образование таких магматических месторождений происходит и сопряжено с горообразовательными процессами действующих плутонов. Поэтому образующиеся рудные тела могли иметь поднятия над собой из массивов пород, или пересекать их (железорудные и апатитовые месторождения). Или образовываться в долинной зоне из-за трещинообразного разрыва, что часто связано с генезисом образования золоторудных месторождений жильного типа.

Излившееся магматическое вещество производит сильные сжимающие напряжения на окружающий массив пород и значительно или полностью перерабатывают часть их, поэтому часто вмещающие породы на месторождениях. Подстилающие и покрывающие, образуют массивы различных типов пород. Такие напряжения можно отнести к тектоническим (десятки и сотни тысяч мегапаскалей).

Следует отметить, что при образовании месторождений могут иметь место несколько этапов формирования рудных тел, и последние остаются на глубине по мере угасания очага плутона.

В зависимости от мощности рудного тела, больших температур, давление газов и водяных паров, часть рудного тела на его границе вступает во взаимодействие с окружающими породами и образует толщу измененных пород с разубоженным содержанием основного компонента. Так образуются породы рудного комплекса (ПРК).

Для Ковдорского железорудного месторождения это окаймление, состоящее из маложелезистых руд, бадделеита, апатитовых руд. Кроме того в верхней зоне месторождения образовались месторождения известкового тела (мела) и апатит-карбонатитовых руд с промышленным содержанием железа и фосфора.

С остыванием поверхности Земли и верхних зон породных массивов разжижение вещества магмы, представленное атомами и молекулами очага зарождения, начинает кристаллизоваться. При этом тело магмы увеличивается в раз-

мерах, как любое жидкообразное вещество при отвердении, и оказывает давление в виде напряжения сжатия на окружающий массив.

Если твердение массивов происходит в той или иной степени одновременно, то контактная зона приобретает и испытывает максимальное напряженное состояние, что часто индексировано на апатитовых рудниках. Если в различное время (при более позднем рудообразовании), то контактная зона представляет собой поверхности смещений.

Такие смещения выявлены на Ковдорском железорудном месторождении в северо-восточной части, где выявлено окаймление рудной пачки, а геологами отмечен провал бурового снаряда при проведении геологоразведки месторождения на данном участке.

При остывании и твердении массивов сверху вниз концентрация напряжений в них будет увеличиваться по мере нарастания зоны твердения и кристаллизации, а также давления столба пород, покрывающих месторождение.

В связи с этим исследователю следует выделять этап выброса магмы с соответствующими давлениями (тектоническими напряжениями) на вмещающую среду (это могут быть еще не сформировавшиеся массивы пород), период твердения и кристаллизации и период постмагматического воздействия (последующего рудообразования или образования нерудных пропластков).

Если период выброса магмы и формирование жидкообразного рудного тела с разрывами окружающего массива создаются напряжения сжатия десятки и сотни тысяч мега паскалей, то напряжение давления столба магмы будет соответствовать величине $\gamma_н$ и другое давление и напряжение при твердении и кристаллизации массива.

Застывающий жидкообразный массив будет испытывать напряжение как от веса столба, так и напряжение, появляющееся при кристаллизации пород, как всестороннее сжатие—разрыв. Величина их может составлять десятки и сотни мегапаскалей (из условия, что рудное тело увеличилось бы в размере при кристаллизации вещества).

Закристаллизованное рудное тело — это прочный конгломерат в напряженном состоянии со значительными связями атомов, молекул, частиц и обладающими свойствами — сцепление от 5—7 до 12—15 МПа (на разрыв) и углом внутреннего трения от 45—50 до 60—70°.

Как свойственно любому твердому телу при остывании и кристаллизации, возникают напряжения разрыва, и рудное тело испытывает разрывные нарушения и трещинообразование.

В зависимости от параметров рудного тела и его типа, генезиса образования и этапов рудообразования эти разрывные нарушения могут быть как продольного, так и поперечного направления. Эти разрывные нарушения также часто связаны не только с плутонами (2—3 км в глубину), но и мега плутонов, охватывающих зоны пород в глубину до 20—30 км и больше, а также развитием трещинообразования нескольких порядков, что снижает влияние первоначальных тектонических сил, и все макро- и микросмещения породных тел происходит в поле гравитационных сил.

На Ковдорском железорудном месторождении выделены один продольный — разрывное нарушение, и два поперечных. Такие же нарушения выявлены на месторождении меди в Палаборе и других месторождениях.

С региональными разрывными, распространяющимися на десятки сотни километров могут быть связаны горизонтальные подвижки плутонов и мега плутонов, поскольку перерабатываемое вещество глубоких магматических зон имеют меньшую объемную плотность и

оно поднимается вверх, сдвигая плутоны и мега плутоны (часто образуя землетрясения). Так нарастала верхняя кора массивов пород, в том числе кора выветривания.

В настоящее время геологоразведкой выявлены три зоны выветривания пород:

I — распространяется на глубину до 100—150 м. Эта зона характеризуется наибольшей трещиноватостью и нарушенностью породных массивов, удельная трещиноватость пород составляет до 20—30 трещин на 1 м керна. Менее трещиноваты рудные зоны, как продукт излияния из более глубоких зон и последующего его твердения.

II — распространяется до глубины 200—300 м и отличается меньшей трещиноватостью — до 10—15 трещин на 1 м керна.

III — условно распространяется на глубину свыше 300—400 м, удельная трещиноватость этих зон составляет до 5—10 трещин на 1 м керна.

В той или иной мере степени трещиноваты массивы и более глубоких зон по причине указанной выше. Только некоторые блоки размером 5—20 м могут быть близкими к монолитным, да и те содержат микро- и макротрещины с присутствием газов.

Исследователи выделяют на месторождениях массивы пород мелкоблочные с покрывающими их наносными породами, средней блочности и крупноблочные.

В отличие от рудных месторождений генезис угольных месторождений отличается тем, что длительное время на массивы пород, особенно покрывающих, влияние оказывают горячие газы, которые выделяются из жидкообразной угольной среды и перемещаются по трещинам на поверхность.

Поэтому массивы пород, вмещающих угольные пласты, наиболее трещиноватые, и представлены породами менее прочными, чем вмещающие породы рудных месторождений, поэтому откосы уступов и бортов разрезов при неправильной их заоткоске часто подвержены сдвижению и обрушению.

В настоящее время при проектировании выработок при открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых значительное внимание уделяется учету физико-механических свойств пород массивов и рудного тела, нарушенности (блочности) массивов и проявлению горного давления.

Точность и надежность определения физико-механических свойств породных блоков, а тем более по образцам типа керн или кубики небольших размеров недостаточна для перехода на натурный массив, поскольку они (пределы прочности на сжатие, разрыв) определяются на малых образцах (кубиках и образцах керна) изначально с занижением величин показателей сцепления и угла внутреннего.

Часто угол внутреннего трения не превышает 43—44°, хотя такие же величины проф. Г.Л. Фисенко получил при испытании мелкофракционного материала. Кроме того определяемый расчетным путем угол откоса уступа и борта карьера переносятся на все уступы и наклон борта в целом.

При этом недостаточно учитывается трещиноватость массивов, ее снижение с глубиной, влияние подтока влаги (воды), сейсмическая нагрузка от действия массовых взрывов и фактор влияния времени. Поэтому рекомендуемые при проектировании откосы уступов и бортов карьеров могут быть или близкими к предельным, или со значительным резервом, что связано с большими объемами выемки породной вскрыши.

Внедряемые в последние годы вертикальные уступы в верхних зонах бортов могут подсекать, с одной стороны, слоистость пород, с другой — дать толчок

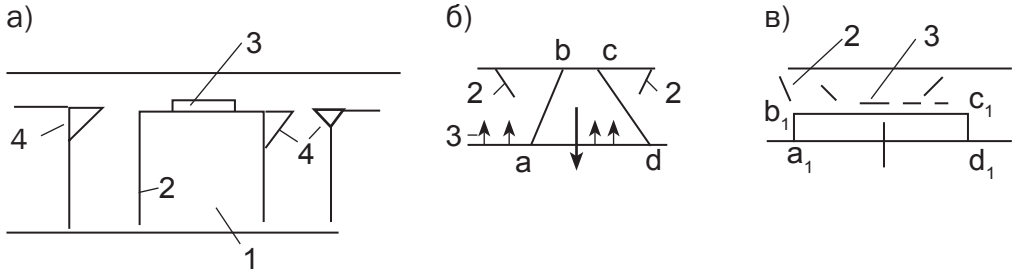

Рис. 2. Схема устойчивости и расчета клина сдвига и плиты потолочины при наложении естественных и техногенных трещин при взрывных работах: а — 1 — камера, 2 — целик, 3 — плита обрушения, 4 — клин сдвига*; б* — 1 — клин сдвига (обрушения), 2, 3 — соответственно естественные и техногенные трещины*; в — схема расчета плиты потолчины при подсечении трещинами:* 1 — плита, 2 — естественные трещины, 3 — слоистость, 4 — техногенные трещины, Р — нагрузка от веса пород

к развитию клина сдвига при наличии трещиноватости пород.

Если сравнить отстройку параметров выработок на открытых и подземных разработках, то следует отметить, что в подземных условиях соответствующей глубины в малотрещиноватых массивах стенки камер высотой 30—50 м давно применяются и устойчивы десятки лет.

Процессы зарождения и развития клина сдвига протекают в поле действия гравитационных сил [4, 5]. Влияние тектонических сил в данном случае может проявиться не непосредственно, а в результате подсечения борта протяженными тектоническими трещинами, при этом возникающие сдвиговые усилия и силы сопротивления сдвигу будут определяться уже полем гравитационных сил. Такие особенности и закономерности имеют место при проведении и отстройке выработок при применении систем с блоковым и подэтажным обрушением, а также при камерных системах разработки.

Устойчивость выработок и характер обрушения (сдвижения) налегающих пород зависит от естественной и техногенной трещиноватости массивов пород. Последняя, при массовых взрывах блоков может развиться на десятки и сотни метров.

Если слоистость массивов гор близка к вертикальной, то при разработке наклонно падающего рудного тела, подсекающего горный массив, «плиты» сдвижения массива будут близки к вертикальным, иметь высоту 50—100 м и быть практически параллельными друг другу при углублении горных работ.

Сдвижение огромных масс породной среды вызывает техногенные удары. Эти особенности и закономерности процессов сдвижения в поле гравитационных сил наблюдались при разработке апатитовых месторождений в Хибинах и на других рудниках страны.

В основу расчетов по определению параметров обнажений при слоевых системах разработки, а также камерных и столбовых, устойчивости целиков также положено учет гравитационных сил, рис. 2.

Повышение вертикального напряжения сжатия и напряжения сдвига при горизонтальном напряжении возникает при учете опорного давления, а также сдвиговых усилий в целиках при массовом взрыве зарядов при камерных системах разработке.

При этом во всех системах разработки необходимо рассчитывать устойчивость «плиты» сдвига (обрушения) при камерно-столбовых и слоевых системах разработки, а также клин сдвига в боковых зонах целиков от действия взрывов при разработке запасов в камерах.

Особый интерес представляет поле напряжений при разработке штокверковых рудных тел, когда при их образовании происходит выброс магмы при гигантских давлениях с разрывом и сжатием окружающих массивов пород, их частичном плавлении и переработке и последующем застывании и кристаллизации вещества магмы.

Если рудное тело глубоко залегающее, то кристаллизация его происходит под давлением большим γH и массив окажется в предельно напряженном состоянии. Подобный случай с проявлением тектонических напряжений может проявиться и в том случае, когда повторный и последующие выбросы вещества магмы происходят тогда, когда верхнее рудное тело еще начало только твердеть и кристаллизоваться.

Поэтому давление в этих зонах будет значительно выше давления от гравитационных сил. Твердение и кристаллизация при всестороннем сжатии на глубоких горизонтах способствует большему прижатию кристаллов друг к другу, и если разрывные напряжения при трещинообразовании меньше сжимающих, то трещины (кроме микро- и макротрещин) в массивах образуется меньше, чем в верхних зонах.

Поэтому массивы пород средних и особенно глубоких зон отличаются крупноблочностью. Это подтверждается и тем, что при разработке рудных тел на глубоких горизонтах, как в карьерах, так и рудниках вынуждены увеличивать расход ВВ, чтобы добиться качественного дробления горной массы.

В связи с приведенной выше характеристикой массивов пород можно предложить дифференцированный подход по обоснованию способа управления откосами бортов карьера на различных глубинах разрабатываемого месторождения, а в подземных условиях параметров блоков и подготовительных выработок.

Смысл этого предложения в том, что если мы произвели заоткоску борта под одним углом, близким к предельному (например, 45—50°), то через 30—40 лет в «клине сдвига» верхних горизонтов под действием комплекса факторов (подтока трещинных вод, выветривания, действия сейсмических сил от массовых взрывов) произойдет ослабление прочностных свойств, увеличатся сдвиговые напряжения, и участок борта начнет деформироваться.

Если борт заоткошен в соответствии с прочностными свойствами пород, трещиноватостью массивов на различных горизонтах и наличия трещинных вод, то устойчивый борт при его заоткоске на верхних горизонтах 43—45°, на средних 48—50°, на глубоких 65—70°, а при доработке до 80—85°, то такой борт будет устойчив 35—45 лет и более.

Если не соблюдены приведенные выше требования, то откосы бортов карьеров часто вступают в стадию деформации. Имеются немало случаев, подтверждающих эти выводы. Так, на глубоком карьере в США даже после 45—60 лет его работы верхняя зона одного из участков борта внезапно пришла в движение, что было неожиданностью для персонала работающих участков.

Ниже приведен пример расчета устойчивости дифференцированного борта глубокого карьера применительно к одному из крутопадающих железорудных месторождений (на примере Ковдорского месторождения комплексных железных руд).

Выделены зоны по глубине геологического разреза H_1 = 120—150 м, H_2 = = 200—250 м, H_3 = 900—500 м. Для пород этих зон определены физико-механические свойства. Они составили: для верхней зоны сцепление C = 0,5—0,7 МПа, φ = 35—39°, для средней зоны — C = = 0,5—9,7 МПа, φ = 40—43°, для глубокой — C = 1,5—2 МПа, φ = 48—50°.

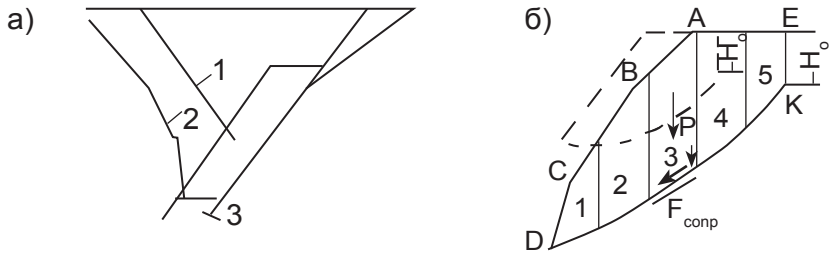

Рис. 3. Схема разработки глубокого карьера этапами и применении плоского борта (1) и дифференцированного по углу откоса с глубиной (2) (а) и схема расчета борта (б): 1—5 — расчетные блоки; Р, Т, Г — соответственно вертикальное усилие сжатие, наклонная составляющая сдвига и усилие сопротивления сдвигу

Расчеты, выполненные при определении параметров борта для данных расчетных характеристик физико-механических свойств пород и их трещиноватости позволили получить углы наклона борта для выделенных зон соответственно $аб_1$ = = 45—47°, $аб_2$ = 50—52° и $аб_3$ = 60—70° (с учетом берм) [5].

Физико-механические свойства пород для Ковдорского месторождения комплексных руд определялись на крупноразмерной сдвиговой установке с площадью среза S = 300×300 мм и срезном приборе для образцов типа керн (d = 42—48 мм).

Эти данные были заложены в основу расчетов параметров Ковдорского с отметкой дна –660 м, с нагорной частью $H_к$ = 930—940 м), рис. 3. При этом рекомендуемое институтом ВНИМИ учет сжимающих напряжений в дне карьера при длине дна L = 300—350 м приняты в качестве резерва его устойчивости.

Выводы

1. Следует различать и выделять месторождения полезных ископаемых по генезису их образования и исследовать контакты их взаимодействия с окружающими массивами пород с целью определения особо напряженных зон, где кристаллизация рудной магмы проходила под давлением выше гравитационных сил.

2. При разработке магматических месторождений, особенно наклонно-крутопадающих, следует учитывать процессы кристаллизации вещества магмы на глубоких горизонтах, приводящих к повышению плотности рудогенеза и снижению трещиноватости массива при всестороннем сжатии.

3. Повышение напряжения в массиве при кристаллизации вещества на глубоких горизонтах, что подтверждается увеличением звукометрических характеристик массива за счет большей плотности пород приводит к увеличению расхода ВВ при их подготовке взрывом.

4. При ведении горных работ открытым и подземным способами следует учитывать образование «перевернутого» клина-сдвига (обрушения), который формируется трещинами наклонного и крутого падения, а также образование в потолочине «плиты сдвига», формируемой действующими зарядами скважин, и обрушаемой при достижении предельного состояния.

5. При разработке крутопадающих и наклонных месторождений полезных ископаемых глубокими карьерами целесообразно применять дифференцированные по наклону с глубиной карьера откосы борта в соответствии с уменьшающейся трещиноватостью пород, и разработку вести на полную мощность рудного тела, что позволяет включить в отработку при одной и той же глубине дополнительно до 25—35% запасов рудного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Короновский Н.В.* Геология. 7-е изд., перераб. — М.: Академия, 2011. — 448 с.
2. К 70-летию члена-корреспондента АН СССР Г.И. Горбунова // Геология рудных месторождений. — 1989. — № 4. — С. 122—123.
3. *Сулимов Б.И.* Геология и разведка Ковдорского вермикулито-флогопитового месторождения. — Л., 1969.
4. *Фисенко Г.Л.* Устойчивость бортов и отвалов на карьерах. — М.: Недра, 1965. — 250 с.
5. *Мочалов А.М.*, *Попов В.Н.*, *Еремин Г.М.* Определение параметров бортов карьеров и поддержание их в устойчивом состоянии. — М.: Изд-во «Горная книга», 2014. — 150 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Ерёмин Георгий Михайлович — кандидат технических наук,
научный сотрудник, Горный институт КНЦ РАН, e-mail: root@goi.kolasc.net.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 11, pp. 5–12.

UDC 271; 622

G.M. Eremin

TECTONICS OF MANTLE PLUME AND POSTMAGMATIC PROCESSES OF ORE SUBSTANCE CRYSTALLIZATION, BLOCK STRUCTURE FORMATION IN ROCK MASS AND THEIR INCLUSION IN THE SURFACE AND UNDERGROUND MINE PLANNING AND DESIGN

The article presents the basics of the methodology to identify stages of ore genesis tectonics, effects of tectonic forces and processes of solidification and crystallization of magma substance under effective forces different by a few orders of magnitude before core tests after stress relaxation with the characteristics of a solid (cohesion and internal friction angle). The methods to account for the aforementioned and to ensure stability of excavations in open pit and underground mining in damaged rock masses are shown.

Key words: tectonics, ore genesis, magma, tectonic stresses, crystallization, fracturing, stability of excavations, calculation of excavation parameters.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-5-12

AUTHOR

Eremin G.M., Candidate of Technical Sciences, Researcher,
Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia, e-mail: root@goi.kolasc.net.ru.

REFERENCES

1. Koronovskiy N.V. *Geologiya*. 7-e izd. (Geology. 7th edition), Moscow, Akademiya, 2011, 448 p.
2. K 70-letiyu chlena-korrespondenta AN SSSR G.I. Gorbunova. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 1989, no 4, pp. 122—123.
3. Sulimov B.I. *Geologiya i razvedka Kovdorskogo vermikulito-flogopitovogo mestorozhdeniya* (Geology and prospecting of Kovdor vermiculite–phlogopite deposit), Leningrad, 1969.
4. Fisenko G.L. *Ustoychivost' bortov i otvalov na kar'erakh* (Pitwall and dump stability in surface mining), Moscow, Nedra, 1965, 250 p.
5. Mochalov A.M., Popov V.N., Eremin G.M. *Opredelenie parametrov bortov kar'erov i podderzhanie ikh v ustoychivom sostoyanii* (Pitwall design and stability), Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2014, 150 p.