

УДК 553.81+551.243+553.078.2

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЕ УЧАСТКА
ЛОКАЛИЗАЦИИ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ «БОТУОБИНСКАЯ»
(ЯКУТСКАЯ АЛМАЗОНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ)**© **Е.В. Серебряков¹, А.С. Гладков², Д.А. Кошкарёв³, И.А. Потехина⁴**¹⁻⁴Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

С помощью геолого-структурных методов изучена разрывная структура участка локализации кимберлитовой трубки «Ботубинская», пространственно находящейся в Накынском кимберлитовом поле Якутской алмазодобывающей провинции. В ходе исследований, проведенных в карьере Ботубинский, создана сеть из 150 точек наблюдения, расположенных на разных горизонтах карьера, благодаря чему получена исчерпывающая информация о тектонической трещиноватости и разрывных нарушениях, необходимая для их картирования и восстановления полей напряжений. Непосредственными полевыми наблюдениями выделены 48 дизъюнктивов, представленных зонами повышенной трещиноватости, дробления и брекчирования, а также собраны данные о более чем 1000 тектонических трещин. Рассмотрены особенности распределения в горном массиве количественных параметров тектонической трещиноватости, таких как густота и плотность, построена объемная модель их распределения в карьерном поле. Анализ полученных моделей позволил подтвердить и дополнить отдельные элементы разломно-блоковой структуры. По результатам обработки и анализа полевой информации построена трехмерная схема разломно-блоковой структуры, отражающая положение основных дизъюнктивных элементов на уровне мезо-кайнозойского структурного яруса платформенного чехла. Установлено, что основную роль в структурном контроле кимберлитовой трубки «Ботубинская» играют субвертикальные разрывные нарушения четырех направлений: северо-северо-восточного, северо-западного, северо-северо-западного, а также северо-восточного. Разрывы северо-северо-восточной ориентировки соответствуют ранее установленному Диагональному разлому, который является рудовмещающим для кимберлитовой трубки. В пределах карьера он представляет собой зону проявления локальных нарушений и тектонической трещиноватости шириной порядка 700 м. Зона образована в результате движений по сместителю Диагонального разлома, расположенному в основании осадочного чехла либо в фундаменте платформы.

Ключевые слова: разломно-блоковая структура; трещиноватость; кимберлитовая трубка; структурный контроль.

**NEW DATA ON FAULT-BLOCK STRUCTURE
OF “BOTUOBINSKAYA” KIMBERLITE PIPE
LOCALIZATION SITE (YAKUT DIAMONDIFEROUS PROVINCE)****E.V. Serebriakov, A.S. Gladkov, D.A. Koshkarev, I.A. Potekhina**

Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

Geological and structural methods have been used to study the fault structure of the localization site of the Botuobinskaya kimberlite pipe located in the Nakyn kimberlite field of the Yakut diamondiferous province. The studies of the Botuobinsky open-pit mine involved the creation of a network of 150 observation points located at

¹Серебряков Евгений Валерьевич, аспирант, старший лаборант лаборатории тектонофизики, e-mail: serebryakov.e.v@mail.ru

Serebriakov Evgenii, Postgraduate, Senior Laboratory Assistant of the Laboratory of Tectonophysics, e-mail: serebryakov.e.v@mail.ru

²Гладков Андрей Станиславович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики, тел.: (3952) 424759, e-mail: gladkov@crust.irk.ru

Gladkov Andrei, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Tectonophysics, tel.: (3952) 424759, e-mail: gladkov@crust.irk.ru

³Кошкарёв Денис Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии и магматизма древних платформ, e-mail: koshkar@crust.irk.ru

Koshkarev Denis, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Geology and Magmatism of Ancient Platforms, e-mail: koshkar@crust.irk.ru

⁴Потехина Инна Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории тектонофизики, тел.: (3952) 424759, e-mail: ip@crust.irk.ru

Potekhina Inna, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Researcher of the Laboratory of Tectonophysics, tel.: (3952) 424759, e-mail: ip@crust.irk.ru

different mine levels enabling to get detailed information about tectonic fractures and faults in order to map them and recover stress fields. The direct field observations allowed to identify 48 faults represented by the zones of intensive fracturing, crushing and brecciation, as well as collect the data on more than 1000 tectonic fractures. Consideration is given to the distribution features of tectonic fracture quantitative parameters such as thickness and density in the rock massif, and a three-dimensional model of their distribution in the mine field is built. The analysis of the obtained models allowed to confirm and complement the specific elements of the fault-block structure. A three-dimensional diagram of the fault-block structure reflecting the position of the main fault elements at the Mesozoic and Cenozoic sedimentary cover structural level has been built on the basis of the processing and analysis results of the field data. It has been found that the main role in the structural control of the “Botuobinskaya” kimberlite pipe belongs to subvertical faults of four directions: north – northeast, northwest, north – northwest and northeast. The faults of north-northeast striking correspond to the ore-bearing Diagonal fault that was identified earlier in the kimberlite pipe. It is represented within the open-pit mine by the zone of local faults and tectonic fractures of 700 m width. The zone was formed as a result of movements of a Diagonal fault shifter located either at the bottom of the sedimentary cover, or in the base of the platform.

Key words: fault-block structure; fracturing; kimberlite pipe; structural control.

Введение

В последнее время изучению разломно-блоковой структуры кимберлитовых месторождений уделяется большое внимание. Повышенный интерес к данному вопросу вызван несколькими факторами, и прежде всего его прикладным значением. Во-первых, изучение особенностей тектонического строения месторождений необходимо для проектирования горных выработок и разработки рационального и безопасного комплекса горных работ. Во-вторых, получаемые результаты в виде тектонических моделей месторождений в дальнейшем служат основой для разработки структурных поисковых признаков и критериев. Не менее важен и научный аспект, направленный на изучение и характеристику возможных механизмов формирования разломно-блоковой структуры ме-

сторождений и их роли в процессе внедрения кимберлитовых тел. Основой таких работ служат детальное структурно-геологическое картирование и тектонофизический анализ разломной сети месторождения, подробное изучение последовательности внедрения разных порций кимберлитового расплава. В настоящей статье представляются результаты геолого-структурного и тектонофизического картирования разломно-блоковой структуры месторождения – трубки «Ботуобинская».

Объект исследования

Алмазоносная кимберлитовая трубка «Ботуобинская», расположенная в междуречье рр. Ханья и Накын (левые притоки р. Марха) на северо-западе Накынского кимберлитового поля относится к числу полностью погребенных кимберлитовых тел [5] (рис. 1).

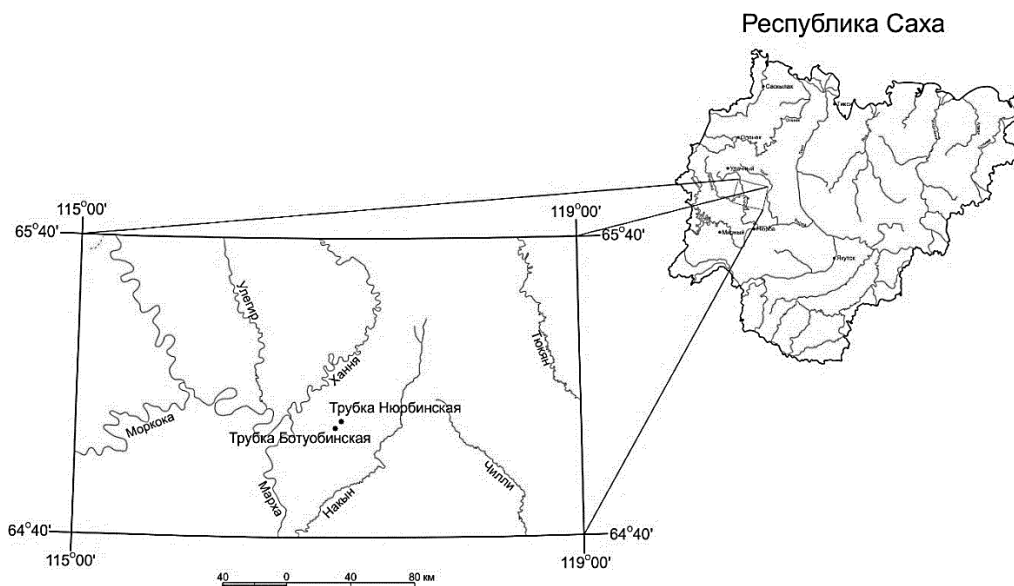


Рис. 1. Пространственное положение объекта исследования

На участке ее локализации широко распространены терригенные и терригенно-карбонатные комплексы осадочных пород венда, нижнего палеозоя, мезозоя и кайнозоя, образующие два структурно-формационных яруса: вмещающий трубку венд-нижнепалеозойский и перекрывающий мезо-кайнозойский. Мощность последнего достигает 110 м. По морфологии это сложное сдвоенное тело. Его юго-западная часть представлена дайкообразным телом, а северо-восточная имеет форму типичной трубки. Дайкообразное тело практически полностью сложено порфировым кимберлитом, а трубчатое представлено эксплозивной кимберлитовой брекчией. В плане трубка вытянута в северо-восточном направлении с соотношением коротких и длинных осей как 1/3 (рис. 2).

Контроль кимберлитовых тел Накынского поля разрывными нарушениями не вызывает сомнения у большинства исследователей. Согласно литературным данным [1, 3], известные кимберлитовые тела региона приурочены к узлу пересечения Вилуйско-Мархинской и Средне-Мархинской разломных зон, первая из которых имеет северо-восточную ориентировку, а вторая – северо-западную. Разломы каждой из зон маркируются дайками долеритов, в результате чего они отчетливо выражаются в геофизических полях в виде линейных контрастных магнитных и гравитационных аномалий. Материалы геофизической службы БГРЭ свидетельствуют, что трубка «Ботуобинская» локализована в зоне «скрытого» разлома северо-северо-восточного простирания (Диагональный разлом), вблизи узла его пересечения с одним из тектонических швов Вилуйско-Мархинского направления (Дьяхтарский разлом).

В силу объективных причин (слабая обнаженность территории, мощные толщи перекрывающих пород), не позволяющих в полной мере использовать прямые структурно-геологические методы, особенности строения разрывной сети на месторождении – трубке

«Ботуобинская» – изучены недостаточно. Большая часть известных элементов тектоники установлена геофизическими методами (высокочастотное зондирование, детальная магнитометрия и др.), а также посредством бурения поисковых и разведочных скважин. Сложившаяся ситуация начала меняться в 2013 г., когда месторождение было вовлечено в промышленную отработку, что позволило вести прямые геолого-структурные наблюдения непосредственно в бортах горной выработки. В связи с этим была поставлена задача по уточнению имеющихся данных о тектоническом положении трубки «Ботуобинская» и составлению качественно новой схемы разломно-блокового строения участка ее локализации.

Методы исследований

Изучение разрывной тектоники в пределах карьерного поля трубки «Ботуобинская» началось с момента проведения горно-подготовительных и вскрышных работ и продолжается в настоящее время параллельно с углублением карьера. Синхронность в сборе фактического материала и развитии горных работ позволяет охарактеризовать тектонические элементы в их исходном состоянии, еще не подверженные экзогенным (выветривание, морозобойное разрушение и др.) и техногенным (взрывные, очистные работы и др.) процессам, что является весьма значимым фактором при восстановлении разломной структуры и геодинамической обстановки, существовавшей на момент внедрения кимберлитового тела.

Непосредственное геолого-структурное картирование было начато с создания сети точек геолого-структурных и тектонофизических наблюдений. На данный момент она насчитывает более 150 точек, расположенных на горизонтах карьера от +240 до +150 м. Подавляющее большинство из них характеризуют основные параметры структурных элементов, распространенных в области развития перекрывающих отложений мезо-кайнозойского возраста, и лишь

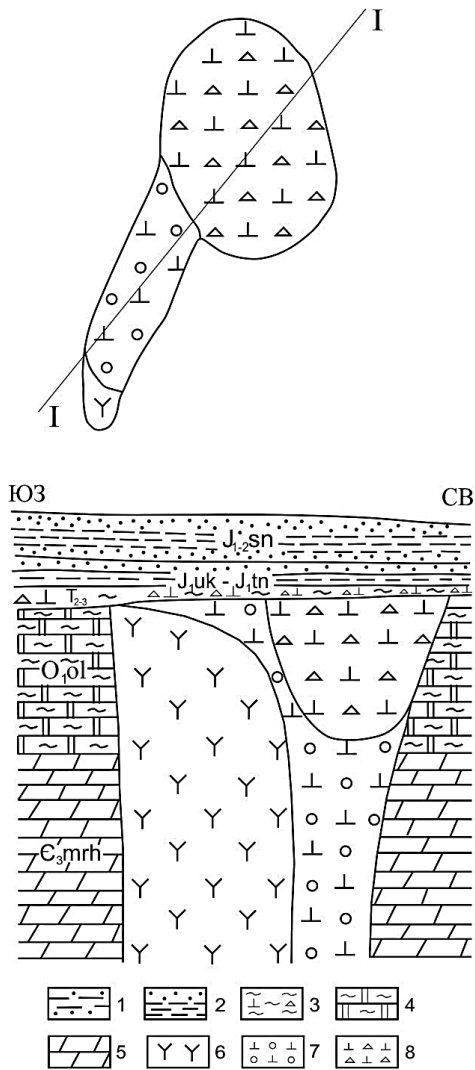


Рис. 2. Схематический план и разрез кимберлитовой трубки «Ботуобинская» [5]:

1–3 – перекрывающие породы мезозоя: 1 – аргиллиты, алевролиты, песчаники сунтарской свиты, 2 – песчаники, алевролиты тюнгской и укугутской свит (нерасчлененные), 3 – карбонатные глины со щебнем доломитов, кимберлитов, интенсивно выветрелые алевролиты средне-верхнетриасовые; 4–5 – вмещающие породы: 4 – доломиты с прослоями плоскогалечных конгломератов, известняков и алевролитов олдрандинской свиты, 5 – известняки, мергели, доломиты с прослоями песчаников и аргиллитов мархинской свиты; 6 – порфиновые кимберлиты (первая фаза внедрения); 7 – аволитовые кимберлитовые брекчии (вторая фаза); 8 – кимберлитовые туфобрекчии (кратерная фазия)

незначительное их количество расположено в пределах вмещающих кимберлиты терригенно-карбонатных пород. Расстояния между пунктами наблюдений в горизонтальной проекции колеблются от 15 до 140 м, в вертикальной –

от 5 до 30 м, что позволяет достичь высокой степени детальности. Организованная подобным образом сеть дает представление о распределении дизъюнктивов в трехмерном пространстве и позволяет строить не только двумерные, но и объемные модели разломно-блокового строения [4].

С использованием принципов специального структурного картирования [2] в каждой точке проводился однотипный комплекс исследований, направленных на сбор информации об основных параметрах тектонической трещиноватости, ее количественной характеристике, локальных разрывных нарушениях, пликативных дислокациях и др. Подобный подход, применяемый на других алмазонасных месторождениях Якутии (трубках «Комсомольская», «Нюрбинская», «Юбилейная»), позволяет получать исчерпывающую информацию о разрывных нарушениях, необходимую для их картирования, определения кинематики и восстановления полей напряжений.

Набор определяемых параметров в каждой из точек зависит от масштаба исследуемого нарушения, то есть его ранга. Так для дизъюнктивов самых мелких рангов – трещин (длиной от 0,1 до 5 м) и крупных трещин (длиной более 5 м) в точке наблюдения определялись элементы залегания основных систем, образованных этими трещинами, устанавливался их генетический тип, а также описывались особенности взаимоотношения систем различных направлений. Помимо этого определялись количественные характеристики трещинной сети. Для этого выполнялся подсчет количества трещин на 1 м^2 изучаемой площадки и оценивалось среднее расстояние между трещинами соизмеримой длины для каждой из систем, что в дальнейшем позволяло рассчитывать два важных показателя, характеризующих особенности блоковой делимости того или иного участка горного массива:

– линейную плотность (густоту каждой системы) Γ_i , измеряемую

количеством трещин, секущих заданное расстояние нормали к их плоскостям;

– объемную плотность P – количество трещин соответствующего ранга на выбранную единицу объема – 1 м^3 или 10 м^3 .

Кроме того, фиксировались параметры отдельных крупных трещин (длина, зияние, амплитуда смещения и другие характеристики). В некоторых случаях их изучение позволяет определить внутреннюю структуру разломных зон.

Дизъюнктивы более высокого ранга – разрывные нарушения – чаще всего представлены зонами повышенной трещиноватости, дробления и грубого расщепления мощностью от нескольких сантиметров до десяти и более метров и длиной от десятков до сотен метров. Для их характеристики помимо элементов залегания определялись видимая мощность, амплитуда смещения, особенности вещественного и структурного заполнения, тип контактов с вмещающей толщей и др.

К числу наиболее масштабных нарушений относятся локальные и региональные разломы. Первые из них являются собой зоны разрывных и пластических деформаций мощностью в десятки и протяженностью от сотен метров до первых километров. Вторые представлены зонами разрывных и пластических деформаций мощностью в сотни метров и длиной в десятки и сотни километров. Локальные и региональные разломы в силу своих масштабных характеристик (мощности и длины) не устанавливались прямыми геологическими методами, а определялись на этапе анализа фактических данных.

Разноранговые дизъюнктивные элементы также подразделяются по углу наклона к горизонту. Так, согласно [4], все разрывы разделены на три группы: 1) субвертикальные (углы наклона $60\text{--}90^\circ$); 2) наклонные (углы наклона $30\text{--}59^\circ$); 3) субгоризонтальные (углы наклона менее 29°). Разрывы первой группы создают блоковую делимость массива и опреде-

ляют вертикальные границы отдельных блоков, а разрывы последней группы выступают в качестве их горизонтальных границ. Наклонные нарушения, как правило, менее масштабны и играют менее значимую роль в разломно-блоковой структуре.

Наряду с дизъюнктивными структурами документации подлежали мелкие складки, будины, структуры закатывания и другие проявления пластических деформаций, поскольку они также отражают общую тектоническую обстановку исследуемого массива. Определялись элементы залегания, морфология, размеры, взаимоотношение с разрывными нарушениями. Однако их изучение проводилось в той мере, в которой это было необходимо для выяснения особенностей разрывной тектоники в пределах конкретной точки наблюдения.

Собранная таким образом полевая геолого-структурная информация была упорядочена, систематизирована и подготовлена для дальнейшего анализа в виде табличных файлов формата *.xls. Эти файлы содержат численные данные, характеризующие количественные параметры тектонической трещиноватости и более масштабных дизъюнктивных элементов, формирующих разрывную структуру месторождения. Обработка полученной информации производилась в программном комплексе RockWorks 15, а визуализация, построение и оформление схем выполнялись в программах CorelDraw и AutoCAD.

Результаты исследований

За период полевых работ 2013–2015 гг. в карьере Ботуобинский был собран достаточно большой объем информации о дизъюнктивных элементах, слагающих структуру изучаемого массива. Измерено более 2000 тектонических трещин и разрывных нарушений более высоких рангов. Руководствуясь принципами, изложенными в [2], акцент в полевых наблюдениях был сделан на изучение параметров тектонической трещиноватости как наиболее универсальной тектонической единицы, характеризую-

щей особенности разломно-блоковой структуры.

Ввиду своей повсеместной распространённости трещиноватость имеет значительные преимущества по сравнению с нарушениями других категорий при изучении разрывной структуры земной коры. Как составной элемент более крупных структурных форм – разломных зон и локальных разрывов – трещиноватость и образованные ею системы определенных направлений могут указывать на наличие зон и разрывов в исследуемом массиве. На этом основан метод выделения разломных зон путем анализа количественных параметров трещиноватости, таких как линейная и объемная плотности. Главное положение данного метода сводится к тому, что самой многочисленной является система трещин, субпараллельная простиранию магистрального сместителя [6]. Построение схем распределения количественных параметров и выделение на них участков с повышенными значениями позволяет интерпретировать их как разломные зоны [4].

Как указывалось выше, в процессе полевых наблюдений были собраны данные, позволяющие охарактеризовать в каждой точке наблюдения параметр G_i – количество трещин на один погонный метр определенной системы. В зависимости от интенсивности трещин того или иного направления значения данного показателя колебались от 0,2 до 3 и более трещин на погонный метр. Дальнейшему анализу были подвергнуты только максимальные и вторые по величине значения параметра густоты. Такая дифференциация позволяет убрать из итоговой схемы точки с заниженными показателями и уменьшить общий уровень «шума».

На основе анализа пространственной ориентировки систем трещин установлено, что наиболее интенсивно проявлены системы, соответствующие по направлению разрывам северо-северо-восточного (аз. прост. 15–40°) простирания и совпадающие с ориентировкой

Диагонального разлома. Также отмечается максимум северо-западной (аз. прост. 290–310°) направленности. Менее распространены системы северо-западного (аз. прост. 290–310°), восток-северо-восточного (аз. прост. 70–90°) и северо-северо-западного (аз. прост. 320–350°) направлений. Их наличие косвенным образом свидетельствует о том, что в структуре исследуемой разломной сети могут принимать участие разломы соответствующих им ориентировок.

В распределении параметра густоты трещиноватости наметилась определенная закономерность, которая выражена в постепенном увеличении показателя G_i от верхних горизонтов к нижним. Так, на отметках +250 м значения G_i составляют в среднем 1 трещину на погонный метр, а уже на горизонте +200...+205 м проявлены максимальные значения G_i , равные 3–5 трещин на погонный метр. Сложившаяся ситуация может объясняться наличием на уровне +195...+215 м первой горизонтальной границы блоков, образованной субгоризонтальными разрывами. Пересекаясь с вертикально ориентированными нарушениями, они значительно увеличивают интенсивность трещиноватости различных систем, что отражается в увеличении как объемных, так и линейных показателей количественных характеристик трещиноватости.

Дальнейшие исследования заключались в изучении параметра N – количества трещин, приходящихся на квадратный метр. Данный параметр измерялся либо в полевых условиях путем подсчета количества трещин в нарисованном на вертикальной стенке круге площадью 1 м², либо в камеральный период в результате интерпретации фотоизображений изучаемых стенок. Для визуализации имеющихся данных о распределении параметра плотности трещин N была построена трехмерная модель в программе RockWorks 2002 при помощи алгоритма Directional Weighting (рис. 3).

Данная модель позволяет получить представление о площадном распределе-

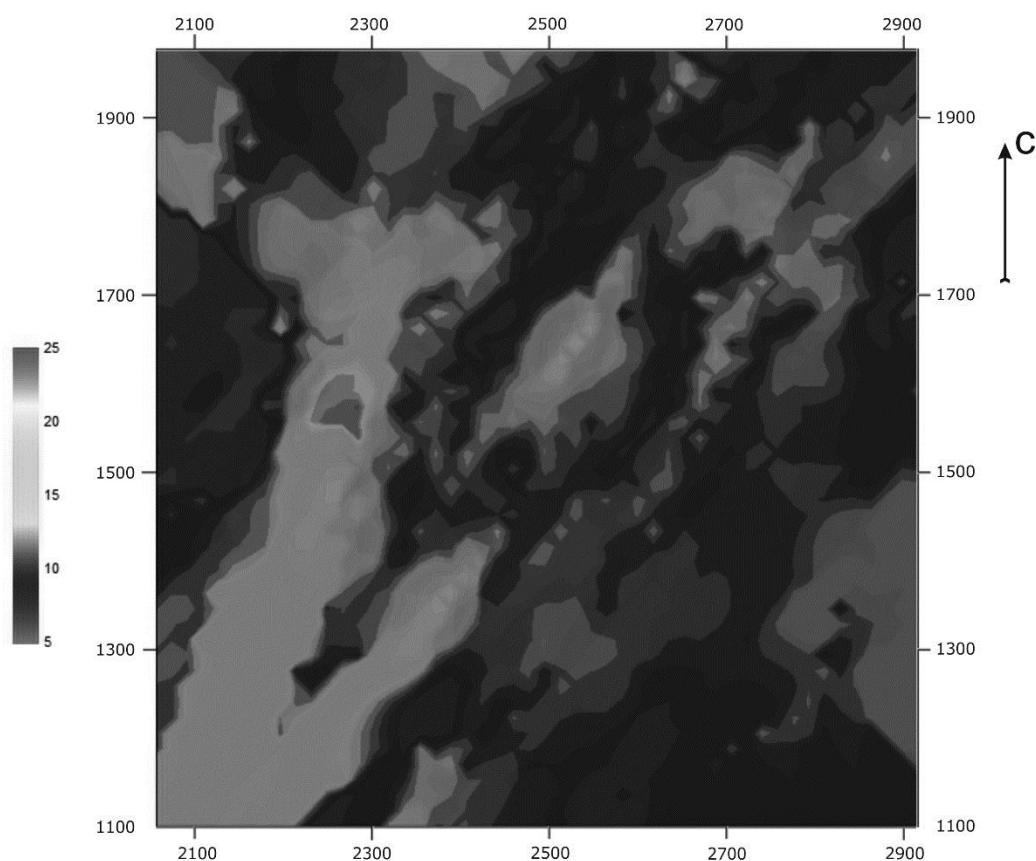


Рис. 3. Трехмерная модель распределения параметра плотности трещин N в карьере месторождения – трубки «Ботубинская» (вид сверху).
Размерность координат приведена в метрах

нии трещиноватости в изучаемом массиве и подчеркивает основные элементы разломно-блоковой структуры участка. На модели отчетливо выделяются три максимума: в центральной, западной и юго-западной частях карьера. Для них характерна общая линейная вытянутость в северо-восточном направлении, указывающая на косвенную связь этих максимумов с разломами той же ориентировки, ведь, как известно, параметр N отражает нарушенность массива и напрямую связан с формированием разломных зон [4].

Помимо материала о тектонической трещиноватости за период полевых работ собран материал, характеризующий более масштабные структурные формы – разрывные нарушения. Общее число зафиксированных в бортах карьера выходов разломных зон составило 48. Однако столь незначительное их количество ни в коей мере не свидетель-

ствует о простом тектоническом строении участка, поскольку строительство карьера только начато и вскрытые уступы характеризуют строение самых верхних слоев разреза (представленных четвертичными и меловыми отложениями), в пределах которых достаточно сложно выделять зоны разломов.

Непосредственные полевые наблюдения на изученных участках, а также аналогия с разрывной сетью, находящейся вблизи трубки «Нюрбинская», позволили установить, что в разломно-блоковой структуре участка локализацию трубки «Ботубинская» определяющую роль играют субвертикальные и субгоризонтальные разрывные нарушения.

Субвертикальные нарушения, зафиксированные преимущественно в юго-западной и северо-восточной частях карьера, представлены зонами повышенной трещиноватости и дробления мощ-

ностью от 0,1 до 10 м. Роза-диаграмма, построенная по простираниям субвертикальных зон, свидетельствует о том, что на уровне мезо-кайнозойского чехла определяющую роль в строении разломной сети карьерного поля играют нарушения северо-северо-восточного (аз. прост. 20–40°) и северо-западного (аз. прост. 300–310°) направлений с подчиненным значением разрывов северо-северо-западной (аз. прост. 340–360°) ориентировки. В совокупности они определяют блоковую делимость исследуемого массива и выступают в качестве вертикальных границ отдельных блоков.

Особенности распределения в про-

странстве субвертикальных зон разрывных нарушений приведены на рис. 4, на котором каждая зафиксированная зона представлена в виде трехмерного диска. Его ориентировка указывает на простирание зоны, наклон – на падение, а ширина пропорциональна мощности. Наиболее крупное нарушение зафиксировано в южном борту карьера на горизонте +230 м. Оно представляет собой зону повышенной трещиноватости мощностью порядка 10 м. Породы в пределах зоны раздроблены, лимонитизированы и по цвету выделяются среди окружающих менее деформированных отложений.

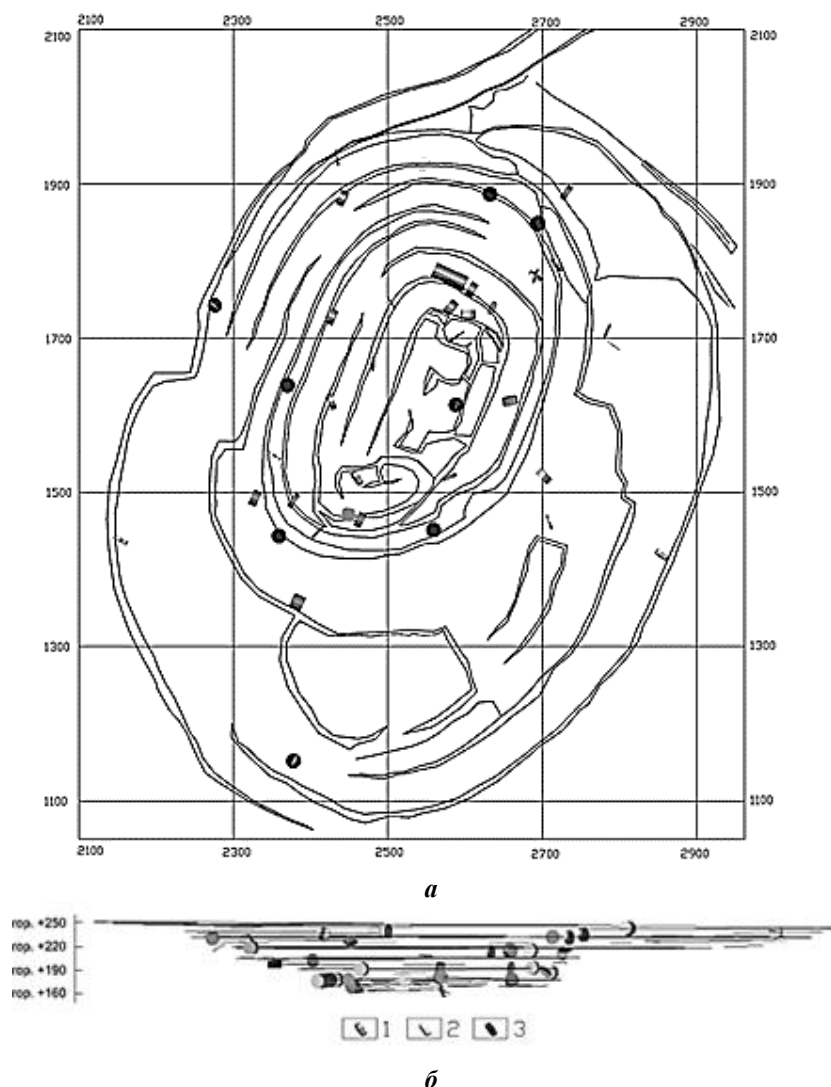


Рис. 4. Схема распределения зон разрывных нарушений, зафиксированных в точках наблюдения на горизонтах карьера Ботуобинский: а – вид сверху; б – вид с запада: 1 – субвертикальные зоны; 2 – наклонные зоны; 3 – субгоризонтальные зоны. Размерность координат приведена в метрах

Субгоризонтальные разрывные нарушения значительно менее развиты в карьерном поле, нежели субвертикальные. По внешнему виду они представляют собой зоны дробления, трещиноватости или расланцевания с мощностью от первых сантиметров до 1–2 метров, в редких случаях до 10 метров. Они образуют горизонтальные границы блоков и определяют их размеры по вертикали (см. рис. 4,б). Приведенная на рис. 4,б схема показывает, что все выявленные в карьере субгоризонтальные нарушения располагаются на гипсометрическом уровне от +195 до +215 м, образуя тем самым первую горизонтальную границу блоков. На отдельных участках такие дизъюнктивы имеют падения, направленные в сторону вскрываемого пространства, что увеличивает риск возникновения осложнений, связанных с оползневыми явлениями и обрушениями.

Наклонные разрывы зафиксированы в северной и южной частях карьера (см. рис. 4). Они представлены мало-мощными зонами дробления восток-северо-восточной ориентировки с углами падения 30–50°, которые не оказывают большого влияния на общую структуру разломной сети в пределах вскрытой части карьерного поля.

Интерпретация полученных данных

Изучение тектоники карьерного поля трубки «Ботуобинская» позволило получить необходимую информацию для построения итоговой схемы разломно-блокового строения участка ее локализации. Собранные данные, включающие замеры элементов трещиноватости и разрывных нарушений, характеризуют общую тектоническую позицию месторождения на уровне мезо-кайнозойского перекрывающего чехла.

Построение схемы производилось путем комплексного анализа материалов, полученных по результатам изучения зон разрывных нарушений и распределения показателя густоты трещиноватости. В качестве опорных точек при построении использовались выходы раз-

ломных зон, зафиксированные при документации бортов карьера. При этом максимальное значение уделялось зонам с наибольшей видимой мощностью. Через такие выходы на трехмерной схеме проводились осевые плоскости, которые представляют воображаемую плоскость, проходящую через центральную часть нарушения. Такой подход позволяет нивелировать возможные ошибки, возникающие из-за наблюдаемых изменений ширины зоны картируемого нарушения на различных горизонтах.

Для участков, на которых в силу объективных причин видимых зон нарушений обнаружено не было, разломные зоны выделялись путем анализа схемы распределения показателя густоты трещин. Их отрисовка производилась по следующей схеме. Из общего числа представленных на схеме дисков, отражающих определенные системы трещин, подбирались такие, которые при схожих азимуте простирания, угле падения и густоте выстраивались в цепочки и полосы. Затем на основе использования трехмерной схемы устанавливалось, имеют ли выбранные диски схожие параметры на глубине. По итогу определения принадлежности дисков к одной плоскости делался вывод о возможном наличии разломной зоны, проходящей через выделенные диски, и по ним проводилась предполагаемая линия сместителя. Результаты выполненных построений приведены на рис. 5.

Представленная картина отражает общую разломно-блоковую структуру участка локализации трубки «Ботуобинская» и включает только субвертикальные разрывные нарушения. Субгоризонтальные и наклонные разрывы на ней не показаны, поскольку полученных данных пока недостаточно для их уверенного выделения. Можно лишь констатировать наличие пологой зоны, образованной субгоризонтальными нарушениями, разграничивающей выделенные блоки на горизонте +205 м (см. рис. 4,б).

Полученная схема (см. рис. 5) свидетельствует о достаточно сложном

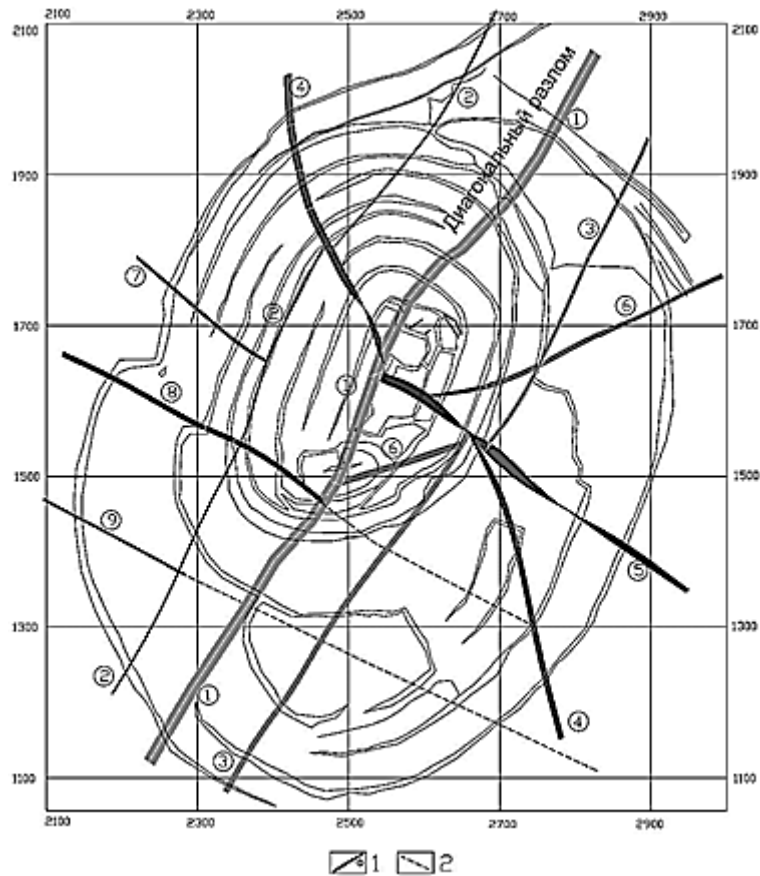


Рис. 5. Схема разломно-блокового строения участка локализации трубки «Ботуобинская»:
 1 – разломы, маркируемые выходами зон разрывных нарушений, и их номера; 2 – предполагаемые разломы. Размерность координат приведена в метрах

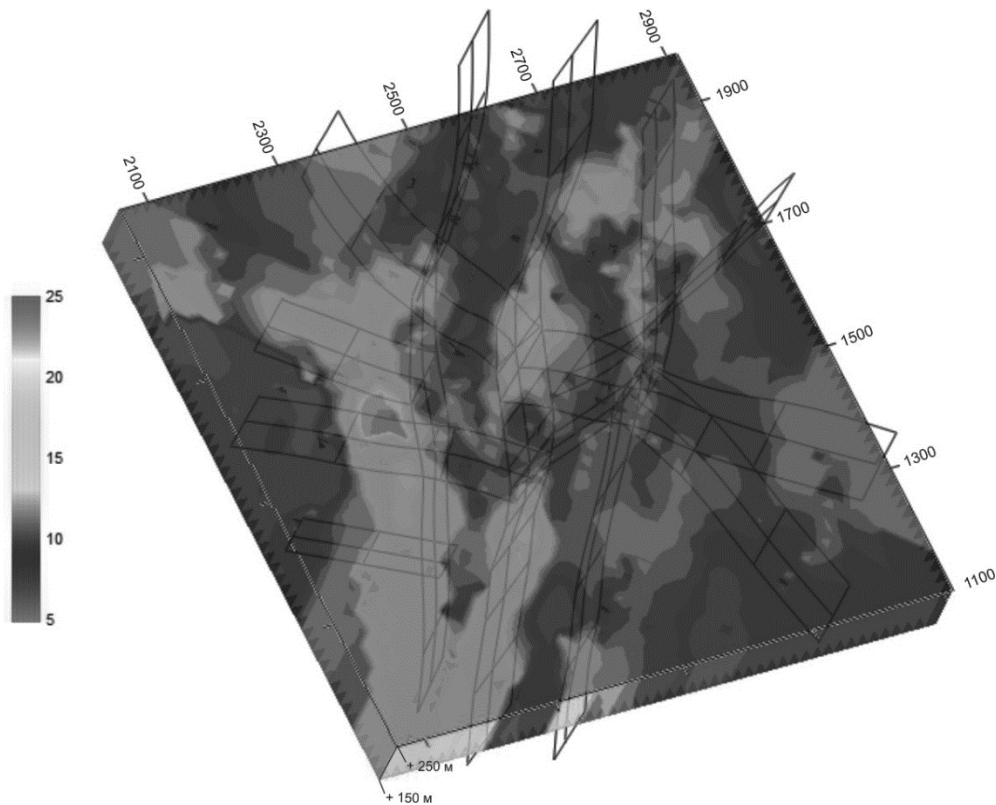
тектоническом строении участка локализации трубки «Ботуобинская». Разрывную структуру определяют субвертикальные разломы северо-северо-восточного (разломы № 1–3), северо-западного (№ 5, 7–9), север-северо-западного (№ 4) и северо-восточного (№ 6) направлений.

В совокупности выделенные разломы разбивают горный массив (в плане) на 3-, 4- и 5-угольные блоки различного масштаба. Учитывая, что зоны разломов характеризуются значениями ширины от первых метров до десятков метров, размеры вычлняемых блоков колеблются от сотен квадратных метров до десятков тысяч квадратных метров. Наиболее мелкие из них наблюдаются в северной части карьерного поля, на участках пересечения нескольких разломных зон. Наименее нарушенными считаются центральная и южная части

массива, где преобладают разломы северо-северо-восточного и северо-западного направлений.

На рис. 6 приведена сводная модель распределения показателя N с наложенными разломными зонами.

Как видно, максимумы показателя N в большинстве своем тяготеют к линиям выделенных разрывных нарушений или к узлам их пересечения. Так, центральный максимум приурочен к узлу пересечения разломов трех направлений: северо-северо-восточного, северо-северо-западного и северо-восточного. Остальные максимумы расположены в зонах разрывных нарушений северо-северо-восточной ориентировки и на участках пересечения их с разломами других направлений. Реже небольшие максимумы находятся в блоках между сближенными в пространстве дизъюнктивами. В то же время ряд выделенных



*Рис. 6. Трехмерная модель распределения параметра плотности трещин N с наложенными разломными зонами (вид с юго-запада)
Размерность координат приведена в метрах*

разломов трассируется цепочками минимумов параметра плотности трещин. Это обусловлено особенностями измерения данного показателя, существенную роль в которых играет экспозиция обследуемой стенки. Во многих случаях изучаемые стенки оказывались ориентированными субпараллельно зонам субвертикальных разрывных нарушений, следовательно, подсчитывались только поперечные трещины, интенсивность проявления которых, как известно, существенно ниже, чем продольных.

Следует отметить, что на представленных объемных моделях хорошо подчеркивается субвертикальный характер выделенных нарушений, а также тот факт, что они прослеживаются на глубины до 100 м в пределах верхних изученных горизонтов (см. рис. 6), что соответствует мощности развития перекрывающего мезо-кайнозойского чехла.

Заключение

Приведенные материалы свидетельствуют о достаточно сложном

тектоническом строении исследуемого участка. Разломная структура месторождения представлена совокупностью субвертикальных разрывных нарушений четырех основных направлений: северо-северо-восточного, северо-западного, север-северо-западного и северо-восточного. Наиболее проявлены разломы первого и второго направлений. Они выделяются как непосредственно при документации стенок карьера в виде зон повышенной трещиноватости, дробления, так и при анализе схем и моделей распределения количественных параметров трещиноватости. На них они представлены либо цепочками трассируемых наиболее проявленных систем трещин, либо вытянутыми линейными максимумами распределения показателя N . Что касается разломов двух оставшихся направлений, на итоговой схеме они выделены по результатам анализа распределения показателя густоты.

Учитывая данные об отсутствии единого сместителя в приповерхностных

горизонтах осадочного чехла, можно сделать заключение о существовании широкой зоны проявления локальных нарушений и тектонической трещиноватости. Она образована в результате движений по сместителю Диагонального разлома, расположенному в основании осадочного чехла либо в фундаменте платформы. Мощность этой зоны, зафиксированная в пределах карьерного поля трубки «Ботуобинская», составляет порядка 700 м.

В результате проведенных полевых исследований, камеральной обработки полученных материалов с помощью современных структурных методов и последующей их интерпретации и визуализации построена качественно новая схема разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки «Ботуобинская». Выявлена и охарактеризована структура разноранговых разрывных нарушений, определяющих

общую тектоническую позицию месторождения на уровне мезо-кайнозойского перекрывающего чехла. Установлено, что в тектоническом строении участка наряду с выделяемым многими Диагональным разломом северо-северо-восточного простирания значительную роль играют разломы северо-западного, северо-северо-западного, а также северо-восточного направлений. Вкупе они образуют разломный узел, который послужил местом внедрения кимберлитовой трубки.

Дальнейшее наращивание сети геолого-структурных наблюдений по мере развития карьера и накопление новых данных, характеризующих дизъюнктивные элементы не только в перекрывающих, но и во вмещающих трубку отложениях, позволит уточнить имеющуюся схему разломно-блокового строения, а также создать трехмерную модель рудовмещающего разломного узла.

Библиографический список

1. Геологические и минералогическо-геохимические признаки структур, контролирующих алмазоносные кимберлиты Накынского поля Якутии / П.А. Игнатов, К.Ю. Бушков, Я.И. Штейн, А.В. Толстов, Ю.Т. Яныгин // Руды и металлы. 2006. № 4. С. 59–67.

2. Семинский К.Ж. Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // Геология и геофизика. 1994. № 9. С. 112–130.

3. Структуры, контролирующие положение кимберлитов Среднемархинского района / В.М. Зуев, С.М. Безбородов, С.Д. Черный, Ю.Т. Яныгин, Ю.Д. Молчанов, П.А. Игнатов, Я.И. Штейн //

Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. Мирный, 1998. С. 260–262.

4. Тектонофизические исследования при алмазопроисхождении: метод. пособие / А.С. Гладков, С.А. Борняков, А.В. Манаков, В.А. Матросов. М.: Научный мир, 2008. 175 с.

5. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 555 с.

6. Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 148 с.

References

1. Ignatov P.A., Bushkov K.Iu., Shtein Ia.I., Tolstov A.V., Ianygin Iu.T. Geologicheskie i mineralogo-geokhimicheskie priznaki struktur, kontroliru-iushchikh alamazonosnye kimberlity Nakynskogo

polia Iakutii [Geological and mineralogical-geochemical features of the structures controlling the diamondiferous kimberlites of the Nakyn field in Yakutia]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2006, no. 4, pp. 59–67.

2. Seminskii K.Zh. Printsipy i etapy spetskartirovaniia razlomno-blokovoi struktury na osnove izucheniia treshchinovatosti [The principles and stages of special fault-block structure mapping on the basis of fracture study]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 1994, no. 9, pp. 112–130.

3. Zuev V.M., Bezborodov S.M., Chernyi S.D., Ianygin Iu.T., Molchanov Iu.D., Ignatov P.A., Shtein Ia.I. Struktury, kontroliruiushchie polozhenie kimberlitov Srednemarkhinskogo raiona [Structures controlling the location of kimberlites in the Srednemarkhinsky area]. *Geologiya, zakonmernosti razmeshcheniia, metody prognozirovaniia i poiskov mestorozhdenii almazov* [Geology, location patterns and methods of diamond deposit forecasting

and prospecting.]. Mirnyi, 1998, pp. 260–262.

4. Gladkov A.S., Borniakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A. *Tektonofizicheskie issledovaniia prialmazopiskovykh rabotakh: metod. posobie* [Tectonophysical studies at diamond exploration: teaching aid]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2008, 175 p.

5. Khar'kiv A.D., Zinchuk N.N., Kriuchkov A.I. *Korennye mestorozhdeniia almazov mira* [World primary diamond deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1998, 555 p.

6. Sherman S.I., *Dneprovskii Iu.I. Polia napriazhenii zemnoi kory i geologostrukturnye metody ikh izucheniia* [Earth crust stress fields and their geological-structural research methods]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989, 148 p.

Статья поступила 18.01.2016 г.