

## ГОРНАЯ ИНФОРМАТИКА

УДК 622:004.9:519.67

### ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

**О. В. Наговицын, А. В. Степачева**

*Горный институт КНЦ РАН,  
E-mail: o.nagovitsyn@ksc.ru, stepacheva@mineframe.ru,  
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Ввиду активной цифровизации процессов, связанных с ведением горного бизнеса, отмечены проблемы, возникающие на пути цифровой трансформации горной отрасли. Раскрыто понятие цифрового двойника, описаны отличия цифрового двойника месторождения твердых полезных ископаемых от других промышленных цифровых двойников. Показано, что главная функция цифрового двойника месторождения заключается в уточнении представлений о месторождении и использовании этих данных для принятия обоснованных решений по развитию горных работ. Для формирования цифрового двойника необходим комплекс автоматизированных инструментов. Горно-геологическая информационная система MINEFRAME соединяет и структурирует в едином цифровом пространстве горно-геологические данные при обработке месторождений твердых полезных ископаемых и формирует план горных работ на основе актуальной геологической информации. Методы технологического и геологического моделирования, в том числе создание цифровых двойников, дают возможность повысить уровень производственной безопасности, определить оптимальную стратегию развития горнодобывающего предприятия.

*Цифровой двойник, месторождение твердых полезных ископаемых, цифровая трансформация, MINEFRAME, горно-геологическая информационная система, геологическое моделирование*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210616

Горнодобывающая промышленность находится под сильным давлением геополитических, экологических и рыночных факторов, требующих все большего повышения эффективности производства. В условиях удаленности и плохой транспортной доступности мест ведения горных работ, неопределенности в запасах и ресурсах полезных ископаемых, операций с высоким риском на рынке минерального сырья все больше усиливается потребность в быстрой цифровизации всех процессов, связанных с ведением горного бизнеса [1]. История развития горных информационных технологий и положительные примеры их практического

использования показывают, что цифровая трансформация является ключом к выживанию горнодобывающих предприятий. Она способна компенсировать снижение производительности в усложняющихся горно-геологических условиях и способствует повышению безопасности ведения работ [2, 3]. Это говорит о том, что имеется значительный потенциал использования методов цифровой трансформации для создания горных предприятий будущего, вооруженных цифровыми технологиями для принятия оптимальных решений [4] и точных прогнозов в режиме реального времени за счет следующих технологий:

- *Цифровое подключение и данные в режиме реального времени.* Широкое использование объединенного в сеть горного оборудования, датчиков и устройств мониторинга позволяет получать данные в онлайн-режиме и проводить более точный анализ складывающейся ситуации. Интеграция информации на уровне предприятия с помощью облачных технологий дает возможность находить оптимальные режимы в сложных технологических процессах, помогая принимать более эффективные решения.

- *Развитая аналитика и интеллект.* Сложные задачи, например геологическое моделирование, управление рудопотоками, прогнозное обслуживание техники, все больше основываются на автоматических алгоритмах. Большие данные, искусственный интеллект решают проблему преобразования данных в полезную информацию и способствуют выявлению критических мест, требующих улучшения, принятия оптимальных решений на основе моделирования развития горных работ [5, 6].

- *Умные технологии, промышленный интернет вещей (IoT) и автоматизация.* Комплексная автоматизация с использованием робототехники и беспилотников применяется в основных и вспомогательных технологических процессах [7]. Телеуправляемое оборудование становится обычным явлением, а развертывание роботизированного оборудования уже набирает обороты в транспортировании, бурении и других технологических процессах.

Нельзя не отметить и проблемы, возникающие на пути цифровой трансформации горной отрасли. Многие из них проявились достаточно давно, другие возникают с введением новых цифровых технологий:

- *риски безопасности данных.* Средняя горнодобывающая компания использует десятки, иногда сотни программных решений, генерируя данные, подверженные рискам в каждом случае обмена данными. Риски возрастают, когда данные еще и циркулируют между многочисленными партнерами;

- *разрозненность и разноформатность данных.* Традиционная ИТ-инфраструктура не способна быстро и экономически эффективно обрабатывать все потоки данных, которые перемещаются от места ведения горных работ в офисы горнодобывающих предприятий и головных компаний;

- *проблемы интеграции.* Отсутствие интеграции данных и устройств препятствует быстрому внедрению таких технологий, как дополненная и виртуальная реальности (AR/VR), IoT и роботизированные комплексы. Накопленная ценность данных не может использоваться, если они не интегрированы для быстрого доступа, безопасного хранения и полноценной обработки;

- *проблемы с устаревшими сетями.* В процессе мониторинга и при ведении горных работ генерируются гигантские объемы данных, что приводит к перегрузке сетевых мощностей и хранилищ данных;

— *задержки, вызванные расстоянием и удаленностью*. Осложненное сетевое взаимодействие из-за географической удаленности мест ведения горных работ затрудняет обработку данных в режиме реального времени. Перемещение данных и их обработка с применением облачных технологий может привести к непрогнозируемым расходам и зависимости от поставщика решения;

— *сложность и непрозрачность облачных вычислений*. На IT-рынке появляются новые и более конкурентоспособные по стоимости поставщики облачных услуг. Однако обмен данными между провайдерами может повлечь дополнительные расходы по непрозрачным тарифам и, как следствие, вызвать технические и финансовые проблемы. К этому добавляются опасения в возникновении зависимости от поставщика облачных услуг в условиях геополитической нестабильности и санкционного давления.

Одним из важнейших инструментов цифровой трансформации являются цифровые двойники объектов и процессов производства. Цифровые двойники самых разнообразных объектов: машин, зданий, процессов производства, городов и многих других — входят в практику различных отраслей промышленности и решают вполне конкретные задачи. Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию реального объекта, имеющую связь с объектом посредством датчиков, сетевых средств связи — промышленного интернета вещей, специального программного обеспечения.

С помощью цифрового двойника можно управлять основными характеристиками изделий, технологическими и производственными процессами и проигрывать различные ситуации без риска и вмешательства в реальное производство. Делать это нужно оперативно и с максимальным отражением свойств и состояния действующего объекта. Цифровые двойники используют данные с датчиков, установленных на конкретных объектах, или другие источники. Это позволяет представлять их состояние, режим работы или расположение, изменение свойств и технологических показателей практически в реальном времени.

Для горной отрасли можно найти довольно много адаптированных определений цифровых двойников. Примем за основное следующее [8]. Цифровой двойник горного предприятия представляет собой виртуальный, динамично развивающийся цифровой образ предприятия, включающий месторождения полезных ископаемых, совокупности горных выработок, основных и вспомогательных технологических процессов, всех технических и инфраструктурных объектов, спроектированный для конкретных природно-технологических, организационных, экономических и экологических условий. Это определение точно отражает суть, однако важнейшие функции цифровых двойников — непрерывное отражение фактического состояния реального объекта в цифровом (их связь) и возможность на его основе выполнять прогнозную аналитику (необходимо для двойников геологической среды) нуждаются в уточнении. Для различных компонентов цифрового двойника точность и оперативность такой связи может различаться. Так, для цифрового двойника парка технологического оборудования сбор данных о состоянии механизмов и узлов каждой единицы техники осуществляется с помощью датчиков, фиксирующих изменения в режиме реального времени. На основе анализа этих данных и прогноза поведения цифрового двойника можно принимать решения о режимах работы оборудования, сроках ремонтов и замены изношенных частей, вывода его из эксплуатации. Для других процессов сокращение временного лага не имеет смысла; например, для стратегического планирования отсутствие информации в цифровом двойнике о последних днях и даже месяцах работы предприятия может не иметь существенного значения, так как рассматривается временной горизонт в десятки лет.

Цифровой двойник совокупности выработок отражает состояние выработанного пространства. В настоящее время данные о выработках собираются маркшейдерской службой и большей частью производятся с помощью человека различными видами съемок. Даже применение современных маркшейдерских технологий, таких как лазерное сканирование, дроны и фотограмметрия, требует участия человека для управления процессом съемки, обработки и анализа результатов. Периодичность такой работы — дни, недели и даже месяцы. Следовательно, цифровой двойник выработанного пространства будет отставать от реальных выработок с таким же лагом. Увеличить оперативность поступления подобной информации можно за счет еще более интенсивного применения дронов, использования данных из источников машинного зрения роботизированных буровых станков, бульдозеров, погрузочно-доставочных машин и экскаваторов, самосвалов и пр., т. е. любых машин, изменяющих выработанное пространство или имеющих возможность проводить мониторинг его состояния. В этом случае оперативность пополнения модели выработанного пространства приблизится к режиму реального времени.

Процесс создания цифрового двойника месторождения в настоящее время полностью зависит от человека, начиная с бурения скважин, работы с керном, проведения анализов и определения литологических типов, до интерпретации факторов, определяющих особенности пространственного распределения свойств полезных ископаемых. Оценка минеральных ресурсов проводится на основе данных опробования, полученных в процессе геологической разведки, объем проб представляет мизерную часть всего месторождения, поэтому очень важно обеспечить статистическую представительность используемого массива проб. Для этого необходимо провести статистический анализ набора данных, убедиться в его корректности, подготовить для дальнейшего использования. Сложность построения модели иллюстрирует диаграмма, представленная на рисунке.



Создание модели месторождения

И если автоматизация, интеллектуализация процесса построения модели изменения при получении новых данных развивается в виде новых математических алгоритмов и развитых процедур модификации моделей по выявленным ранее закономерностям, то автоматизация процессов проведения разведочных выработок (скважин, траншей, борозд и пр.) находится в начальной стадии развития. Более оперативным может стать анализ поверхности забоев и развалов горных пород при помощи сканирования, основанного на геофизических принципах (рентгенолюминесцентный, гамма-спектральный, рентгеноспектральный и др.). При полной роботизации этих процессов временной лаг с суток может сократиться до минут.

Другое отличие цифрового двойника месторождения твердых полезных ископаемых (ЦДМ) от других промышленных цифровых двойников состоит в том, что процесс поддержания двойника в актуальном состоянии означает не столько мониторинг изменений при отработке его частей, сколько получение новых сведений о неотработанной части и прогноз динамики изменения запасов будущей разработки. Таким образом, главная функция ЦДМ заключается в уточнении представлений о месторождении и использовании этих данных для принятия обоснованных решений по развитию горных работ. При формировании ЦДМ и его актуализации задействованы специалисты, вовлеченные в процесс сбора и обработки данных опробования, их интерпретации и корректировки геологической модели. Эта работа проводится с помощью горно-геологических информационных систем (ГГИС).

Современные ГГИС характеризуются следующими особенностями:

- назначение ГГИС: решение специальных технологических задач геологоразведки и эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых;
- структура ГГИС: набор программных модулей и баз данных;
- пространственные данные, обрабатываемые ГГИС: точки, линии, триангуляционные сети, объемные тела, блочные модели, регулярные и нерегулярные сети.

Основные функции ГГИС:

- управление базами данных;
- интерактивная 3D-графика и моделирование;
- геологическое моделирование;
- решение маркшейдерских и геодезических задач;
- проектирование буровзрывных работ;
- проектирование и планирование горных работ;
- формирование горной графической документации.

ГГИС — комплексные программные продукты, позволяющие не только моделировать геологическую среду, но и предоставлять инструменты для принятия решений по рациональному освоению минеральных ресурсов — проектированию и планированию горных работ. Для полноценного использования этих инструментов необходим комплекс решений для поддержания ЦДМ в актуальном состоянии. Процесс поддержания ЦДМ должен обеспечивать синхронизированную обработку всех его частей — опробование, векторные, каркасные (триангуляционные) и блочные модели, осуществлять корректировку подсчета запасов по изменившимся участкам и в целом по месторождению. Можно выделить несколько функциональных блоков, задействованных в этом процессе:

- инструменты пополнения базы данных опробования (от бурения и координатной привязки до лабораторного опробования и внесения информации в базу данных);

- средства для каркасного моделирования, позволяющие модифицировать часть триангуляционной сети поверхности геологических объектов;
- средства блочного моделирования, модифицирующие часть блочной модели, интерполяционные методы пересчета качественных показателей.

На примере функций, реализованных в отечественной ГГИС MINEFRAME [9–12], рассмотрим процессы, связанные с формированием моделей месторождений и их цифровых двойников. ГГИС соединяет и структурирует в едином трехмерном информационном пространстве горно-геологические данные при обработке месторождения твердых полезных ископаемых. В ГГИС анализируется и хранится информация о скважинном, бороздовом и шламовом опробовании, о качественных показателях полезного компонента в руде, горных выработках, о залегании пластов и закладочных работах, формируется план горных работ на основе актуальной геологической информации, содержащейся в ЦДМ.

### ПОПОЛНЕНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ОПРОБОВАНИЯ

В основе большинства моделей геологических объектов лежат векторные конструкции, описывающие контакты литологических типов, сортов и кондиционных разновидностей руд, для моделирования которых основным является скважинное опробование. Данные рядового опробования импортируются в геологический редактор с автоматизированным контролем ошибок: на пересечение интервалов, пропуски данных, включающих как диапазон опробования, так и значения содержаний компонентов, корректность измерения точек перегиба инклинометрии и многие другие.

На основе модели геологических проб решаются задачи по созданию моделей рудных тел, геостатистическому исследованию месторождений, оценке запасов полезных компонентов по месторождению и в выемочных единицах.

Для проведения статистического анализа геологической информации и дальнейшего подсчета запасов ГГИС предлагает многокритериальные выборки данных опробования: по принадлежности к различным геологическим признакам и пространственную фильтрацию. Доступны варианты формирования выборки и на основе данных опробования непосредственно в трехмерном окне системы: добавление проб, попавших внутрь каркаса выбранного объекта, добавление целиком кондиционного интервала или выбор конкретной пробы, выработки или скважины.

Важный этап построения геологических моделей — статистический анализ данных:

- определение типа распределения содержаний основных компонентов;
- анализ наличия однородных совокупностей содержаний основных компонентов;
- оценка статистических параметров содержания основного полезного компонента.

На основе данных опробования с помощью гистограмм распределения содержания оцениваются различные статистические показатели. Гистограмма распределения строится по выборке проб, попавших в контуры рудных тел, показывает наличие статистической однородности или неоднородности, к которой подбирается вид распределения, и позволяет обнаружить явные погрешности в исходных данных геологического опробования с помощью определения ураганных значений [13, 14].

Исходя из условий изученности моделируемого участка, густоты сети скважин, площади покрытия разведочной сетки, необходимо выделить структурные домены, подсчетные блоки, объединяющие области со схожими свойствами, очередностью образования и процессов метаморфизма. Явный признак присутствия нескольких популяций в геологической среде —

наличие нескольких пиков при построении гистограммы распределения содержаний полезных ископаемых. Результатом выявления домена служит геометризация выделенной области в 3D-пространстве.

Пополнение базы данных опробования возможно с использованием моделей горных выработок и инструментов ввода, предлагающих ручной (с заданием необходимых параметров, включающих точку привязки и выбор направления опробования) и интерактивный (с указанием непосредственно координат на экране) способы.

В подземных условиях данные из текстовых файлов, полученные с приборов геофизического опробования, вводятся в базу данных с привязкой к маркшейдерским и другим опорным точкам. В случае, когда отсутствует прямая видимость от маркшейдерской точки до точки опробования, измерение проводится вдоль оси выработки.

Для каждого месторождения определены параметры кондиций, на основе чего выполняется оконтуривание рудных тел. В ГГИС имеются несколько сценариев выделения кондиционных интервалов для разных типов месторождений: угольных, урановых и рудных. После автоматического выделения кондиционных интервалов возможна их ручная корректировка. Выделенные кондиционные/сортовые интервалы полезных ископаемых или литологические типы пород служат исходной информацией для пополнения цифровой модели месторождения полезных ископаемых.

#### **КАРКАСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

На основе геологических характеристик, описания строения и морфологии рудных тел, с учетом анализа условий залегания используются следующие методы создания контуров рудных тел, а также входящих в них подсчетных блоков:

- оконтуривание рудных тел на вертикальных разрезах и по плану блокировки запасов;
- построение каркасных моделей рудных тел.

Основой для оконтуривания балансовых и забалансовых запасов на вертикальных разрезах являются контуры, отображенные на геологических разрезах и профилях. При оконтуривании в трехмерной среде учитывается пространственное положение скважин и отдельных проб. Соответственно, контуры контактов рудных тел строятся с привязкой точек контуров к границам крайних рядовых проб, составляющих кондиционные рудные интервалы, а промежуточные точки, расположенные между ними, располагаются в плоскости, заданной ближайшими пробами. Краевые точки контура, места выклинивания пластов обычно проецируются на плоскость разреза в случае, если они не завязаны на известную точку опробования.

Учитывая достаточно сложное расположение разведочных выработок в пространстве, весьма сложно создать каркасную модель, позволяющую полностью учитывать трехмерное положение скважин и получать корректные оценки объемов, основываясь только на оконтуривании вертикальных разрезов. Поэтому дополнительно проводится оконтуривание рудного тела в плане.

На втором этапе моделирования строится каркасная модель путем последовательного создания сплошной триангулированной поверхности между горизонтальными и вертикальными контурами. При построении используются различные методы триангуляции:

- триангуляция между смежными контурами;
- триангуляция Делоне;
- триангуляция на поверхности, полученной с помощью билинейной интерполяции.

В последнем случае поверхность оболочки тела разбивается на четырехсторонние области, ограниченные участками контуров вертикальных и горизонтальных разрезов. Локализованные таким образом участки поверхности моделируются с помощью метода билинейной интерполяции [15]. Такое моделирование обеспечивает формирование поверхностей с созданием дополнительных точек в поле между краевыми участками контактов: точки противоположных сторон такой области, соединяясь между собой, задают геометрию ее внутреннего пространства, координаты точек которого вычисляются с помощью билинейной интерполяции в двух направлениях. Исходные и сгенерированные точки становятся основой для построения каркасной триангуляционной модели геологического тела.

Для пластовых месторождений используется вариант неявного (имплицитного) моделирования, при котором по кондиционным интервалам скважинного опробования происходит автоматическое построение модели поверхности кровли и подошвы пласта. Сначала моделируется пласт по простиранию и падению с ограничивающими контурами нулевой мощности (отстраиваются на основе анализа рудных и пустых скважин), затем по этой модели выделяются участки кондиционной мощности.

Сглаживание и детализация триангуляции поверхностей пластов и топоповерхностей обеспечивается методами сеточного моделирования, когда в поверхность добавляются дополнительные точки, являющиеся узлами прямоугольной или треугольной сетки в проекции на некоторую плоскость. Координаты таких точек интерполируются методами дистанционного взвешивания.

#### **СРЕДСТВА БЛОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Дальнейший шаг геологического моделирования объектов — блочное моделирование. Блочные модели дают наиболее полное представление о распределении запасов на месторождении и облегчают процесс планирования горных работ для открытой и подземной разработки, построения экономических моделей для определения границ карьеров и т. д.

Блочное моделирование с интерполяцией содержаний полезного компонента в рудных телах и выемочных единицах выполняется геометрическими методами (метод ближайшей пробы) и методами дистанционного взвешивания (метод обратных взвешенных расстояний и геостатистический метод — кригинг). Интерполяция проводится для всех рудных тел, состоящих из доменов или подсчетных блоков.

При геостатистическом анализе данных осуществляется вариограммный анализ, предназначенный для нахождения корреляции между точками опробования в зависимости от расстояния между ними и их местоположения в пространстве [16]. Вариограммный анализ дает возможность получить функциональные зависимости, используемые в дальнейшем в процедуре расчета распределения качества в блочной модели.

Изменение цифровой геологической модели позволяет оценить состояние запасов, технологические показатели извлечения полезных ископаемых, потери и разубоживание и в целом экономическую целесообразность отработки месторождения при планировании горных работ. Описанные средства построения и модификации геологических моделей приближают нас к моменту, когда цифровые двойники станут частью комплексных цифровых двойников горных предприятий, являющихся частью средств автоматизированных процессов управления горными работами.

## ВЫВОДЫ

Для цифрового двойника месторождения основной и критически важной является прогнозная функция. Вероятностный и дискретный характер данных геологического опробования предопределяет дефицит достоверной информации о месторождении во время работы горного предприятия. Использование цифровых двойников месторождений помогает более достоверно спрогнозировать изменение показателей запасов минерального сырья при развитии горных работ.

Показано, что на современном этапе двухсторонние связи между цифровыми моделями объектов горных технологий и реальными объектами могут быть реализованы с участием человека и присущих этому потерь времени на обработку информации, что не является препятствием для выработки своевременных решений при планировании горных работ в связи с достаточно большими технологическими периодами (от смены и более).

Предложены методы формирования и обеспечения функционирования цифрового двойника месторождений твердых полезных ископаемых, включающие средства оперативного ввода данных опробования, каркасного и блочного моделирования, оценки запасов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее // Горн. журн. — 2020. — № 9. — С. 13–18.
2. **Günther F., Mischo H., Lösch R., Grehl S., and Güth F.** Increased safety in deep mining with IoT and autonomous robots, Appl. Comp. Operat. Res. in the Miner. Industry Proc. of the 39<sup>th</sup> Int. Symp. APCOM 2019, Wroclaw, Poland, 2019. — P. 603–611.
3. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Горно-геологические информационные системы, область применения и особенности построения // ГИАБ. — 2016. — № 7. — С. 71–83.
4. **Dyson N.** Syama's automation surge. <https://www.miningmagazine.com/technology-innovation/news/1387604/syama%E2%80%99s-automation-surge>. Дата обращения 06.09.2021.
5. **Huang L., Balamurali M., and Silversides K. L.** Machine learning classification of geochemical and geophysical data, Appl. Comp. Operat. Res. in the Mineral Industry Proc. of the 39<sup>th</sup> Int. Symp. APCOM 2019, Wroclaw, Poland, 2019. — P. 101–105.
6. **Avalos S. and Ortiz J. M.** Recursive convolutional neural networks in a multiple-point statistics framework, Appl. Comp. Operat. Res. in the Mineral Industry Proc. of the 39<sup>th</sup> Int. Symp. APCOM 2019, Wroclaw, Poland, 2019. — P. 168–176.
7. **Feng S. and Ding E.** Designing top layer in Internet of Things for underground mines, Appl. Comp. Operations Res. in the Mineral Industry Proc. of the 39<sup>th</sup> Int. Symp. APCOM 2019, Wroclaw, Poland, 2019. — P. 695–702.
8. **Анистратов К. Ю.** Открытые горные работы — XXI век. Справочник. Т. 2. — М.: ООО “Система максимум”, 2019. — 872 с.
9. **Лаптев В. В., Звонарева С. В., Неведров А. С.** Инструменты моделирования закладочных работ в системе MINEFRAME // ГИАБ. — 2019. — № S37. — С. 187–194.
10. **Наговицын Г. О., Билин А. Л., Звонарева С. В.** Новые возможности ГГИС MINEFRAME для технологического и стоимостного расчета транспортных затрат // ГИАБ. — 2019. — № S37. — С. 241–248.

11. **Уразгулов М. Р.** Комплекс МАЙНФРЭЙМ — основа создания цифровой модели горных работ (на примере АО “Учалинский ГОК”) // Рациональное освоение недр. — 2020. — № 2. — С. 54–58.
12. **Лаптев В. В., Смагин А. В., Гурин К. П.** Автоматизированные инструменты обработки данных маркшейдерского замера в ГГИС MINEFRAME // ГИАБ. — 2019. — № S37. — С. 195–204.
13. **Лукичев С. В., Наговицын О. В., Ильин Е. А., Рудин Р. С.** Цифровые технологии инженерного обеспечения горных работ — первый шаг к созданию “умного” добычного производства // Горн. журн. — 2018. — № 7. — С. 86–90.
14. **Coombes J.** I’d like to be OK with МК, UC: A critique of mineral resource estimation techniques, Perth: Coombes capability, 2016. — 261 p.
15. **Шенен П., Коснар М., Гардан И., Робер Ф., Витомски П., Кастельжо П.** Математика и САПР, кн. 1. — М.: Мир, 1988. — 204 с.
16. **Капутин Ю. Е.** Горные компьютерные технологии и геостатистика. — СПб.: Недра, 2002. — 424 с.

*Поступила в редакцию 08/X 2021*

*После доработки 20/X 2021*

*Принята к публикации 11/XI 2021*