

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.013

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПЕРСПЕКТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И МУЛЬТИКОМПОНЕНТНАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ

Й. Бенндорф, Р. Димитракопулос*

*Департамент наук о Земле и инжиниринга, CEG, TU Delft, E-mail: J.benndorf@tudelft.nl,
*COSMO — Лаборатория стохастического производственного планирования
работы горнорудных предприятий, Департамент горного дела и материальных потоков,
Университет Макгилла, E-mail: roussos.dimitrakopoulos@mcgill.ca, Монреаль, Канада*

Выполнение производственных задач по качеству и объему руды имеет критическое значение для успешной работы горного предприятия. Изменчивость качества руды и неопределенность пространственного распределения запасов и показателей качества могут служить причинами отклонения от производственных планов и общего финансового дефицита. Метод стохастического целочисленного программирования (SIP), разработанный в данной работе, объединяет в одно целое геологические неопределенности, представленные множеством одинаково возможных описаний неизученного рудного тела. Метод SIP учитывает не только дисконтирование денежных средств предприятия и отклонение от производственных целей, но и геологические риски для реального горного производства. Применение SIP для железорудного месторождения Западной Австралии доказало возможность контролировать этим методом риск отклонения от производственных целей во времени. Стохастический план работы рудника обеспечивает меньший риск отклонения от целевых значений показателей качества по сравнению с традиционным методом планирования горнорудного производства на основе детерминированной интерполяционной модели рудного тела.

Оптимизация карьера, стохастическое моделирование, мультикомпонентные месторождения, железная руда

ВВЕДЕНИЕ

Цель перспективного планирования горнорудного производства — разработать “наилучший” план рудника с учетом ограничений, вызванных физическими и геологическими условиями, стратегией управления и технологическими условиями. Термин “наилучший” обусловлен административными целями, которые обычно включают максимизацию монетарной ценности горного проекта, а также ожиданий потребителей продукта горного производства и гарантии безопасной работы. Ожидания потребителей выражены, главным образом, в объемах руды и ее качественных характеристиках. Для мультикомпонентных месторождений качест-

Благодарим за финансовую поддержку NSERC, грант 239019-06 и BHP Billiton, Rio Tinto, AngloGold Ashanti and Xstrata.

венные характеристики руды определяются множеством взаимосвязанных параметров. Например, для железорудных месторождений компоненты железа (Fe), фосфор (P), кремнезем (SiO_2), глинозем (Al_2O_3) и потери при прокаливании (ППП) являются критическими для качества руды. Помимо этого руду часто добывают с разных участков и она имеет разные характеристики. Цель любого перспективного планирования горного производства — получить максимально однородный продукт из руды, добытой на разных участках, который отвечал бы техническим характеристикам, заявленным потребителем, при гарантированной оптимальной эксплуатации карьера и максимально комплексном использовании разрабатываемых природных ресурсов. Однако на практике при плановой добыче руды нередко встречается несоответствие объема добытой руды и ее качественных характеристик, причиной которого является неопределенность в описании пространственного распределения различных компонентов рудной залежи наряду с локальной изменчивостью их качества.

Традиционный подход к оптимизации планирования работы рудника основан на детерминированной модели рудного тела, не учитывающей локальную изменчивость и неопределенность, связанную с описанием рудной залежи [1, 2]. Разработана система методов условного моделирования, призванная аннулировать недостатки оценочных методов [3–5]. Используя данные скважин и их статистические свойства, условное моделирование позволяет построить несколько равновероятных моделей (или сценариев) месторождения, каждая из которых отражает имеющуюся информацию, статистику и локальную изменчивость данных в пространстве. Различие между этими сценариями — количественная мера неопределенности. Последовательная интеграция неопределенности качества и локальной изменчивости в оптимизацию планирования работы рудника позволяет выявить, понять и контролировать геологические риски, что в конечном итоге снижает риск проекта и повышает его рентабельность.

В литературе описаны негативные последствия игнорирования локальной изменчивости качества и неопределенностей в описании рудной залежи при определении оптимального плана работы рудника [6–8]. Так, в [8] авторы демонстрируют, как опасно брать в качестве базиса оценочную модель рудной залежи среднего типа. В приведенном примере оценка чистого дисконтированного дохода (ЧДД) относительно эксплуатационного срока рудника по смоделированным сценариям рудной залежи оказалась на 25 % ниже прогнозируемой. Безусловно, позитивное влияние учета неопределенности качества на основании многочисленных смоделированных сценариев и нового стохастического метода оптимизации также освещено в литературе. В [9] метод перспективного производственного планирования на основе технологии “имитации отжига”, примененной для золотого рудника, позволил получить увеличение стоимости проекта на 28 % по сравнению с традиционным методом. В [10, 11] дано описание применения этого метода для медного рудника. Более универсальный и гибкий метод перспективного производственного планирования, который позволяет контролировать геологические риски в межпроизводственные периоды по объему и изменчивости качества руды, основан на стохастическом целочисленном программировании (SIP) [12] и предложен в [13, 14]. Применение SIP [13] для перспективного производственного планирования мультикомпонентного месторождения демонстрирует его эффективность для увеличения ценности проекта и управления рисками даже при относительно коротком сроке эксплуатации рудника. Дополнительные разработки касаются проектирования последовательности выемки [15], эффективного SIP решения [16] и интегрированной неопределенности качества и финансов [17].

В данной работе метод оптимизации производственного планирования использован для рассмотрения совокупной неопределенности мультикомпонентного качества, типичной для многих месторождений полезных ископаемых, в частности железорудных месторождений.

Другими словами область метода стохастического целочисленного программирования [13] расширена и охватывает (а) мультикомпонентные месторождения, (б) включает новые ограничения пригодности месторождения к разработке, в которых размеры используемого выемочно-транспортного оборудования увязаны с параметрами системы разработки. Помимо этого, предлагаемый авторами метод был верифицирован на открытом железорудном руднике Западной Австралии для производственного планирования работы нескольких карьеров рудника. Верификация включала проверку возможности SIP контролировать риск отклонения от производственных целей по показателям качества руды. В нескольких разделах метод стохастического математического программирования представлен впервые. Дано описание применения и проверки метода, а также сравнение SIP и традиционных методов для детерминированной модели рудного тела. Затем следуют обсуждение и выводы.

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

В мировой практике оптимизация перспективного производственного планирования рассматривает вопросы оптимальной последовательности разработки нескольких участков, мультикомпонентный состав, усреднение качества, складирование, альтернативные схемы обогащения и получения конечных продуктов [18, 19]. Можно выделить две стадии перспективного производственного планирования работы рудника, включающего несколько участков. На первой стадии определяют конечные границы всех участков, а также соотношение и количество полезных компонентов для того, чтобы установить, в какой период каждый участок может внести свой вклад в достижение общей цели оптимизации общих ресурсов. На второй стадии определяется физическая последовательность выемки блоков для каждого участка в виде ограничений производительности и качества ценных компонентов в рамках планирования работы системы участков. Это позволяет сконцентрироваться на перспективном планировании работы единичного карьера, поскольку методы планирования работы системы карьеров, например метод BLASOR, разработанный группой BHP Billiton's Technology, уже успешно освоены [20].

Перспективное производственное планирование при условии неопределенности качества руды отдельных карьеров направлено на выявление последовательности физической выемки блоков в определенные интервалы времени для достижения поставленных целей: (а) оптимальное развитие рудника и максимальное использование минеральных ресурсов для получения максимальной монетарной значимости ресурсов, (б) контроль риска отклонения от производственных задач, (в) гарантия безопасной работы. При этом контроль риска отклонения от производственных целей является главным по значимости и включает контроль вероятности и степени отклонений от производственных целей, а также колебаний качества добытого материала по периодам. Имеющаяся геологическая неопределенность установлена набором моделей рудных тел, удовлетворяющим кондициям. Обычно производственные цели выражены в виде объема производства руды, породы и хвостов, а также содержания различных компонентов. Ограничениями могут быть целесообразность плана, ремонтпригодность оборудования, производительность добычи и обогащения, геотехнические аспекты, требования к усреднению.

СТОХАСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Общий метод перспективного производственного планирования при условии геологической неопределенности многокомпонентного месторождения основан на SIP в формулировке для единичного компонента [13].

Целевая функция

Целевая функция SIP, представленная в данной работе для планирования разработки поликомпонентных единичных залежей, объединяет несколько целей: сформировать производственный план, оптимизирующий экономическое развитие рудника, включающего несколько участков, с учетом характерных ограничений, а также минимальные отклонения от производственных задач по объему и качеству производимой руды при минимальной стоимости производства руды неоднородного качества. Ниже приведены три слагаемых целевой функции:

$$\begin{aligned} & \text{Maximise} \quad \sum_{t=1}^P \sum_{i=1}^N c_i^t x_i^t, \\ & - \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^P \sum_{r=1}^R ({}^s q u_r^t y u_r^t + {}^s q l_r^t y l_r^t), \\ & \quad \sum_{t=1}^P \sum_{j=1}^K c_{SM} Y l_j^t, \end{aligned} \tag{1}$$

где P — количество периодов; N — общее число блоков для планирования; S — число имитирующих моделей залежи для улавливания геологической неопределенности; R — число переменных — показатели качества и объем руды; c_i^t — экономический вклад i -го блока, разрабатываемого в период t , представляет прогнозируемую экономическую ценность всех полезных компонентов блока i в период t , полученную для каждой реализации s ; x_i^t — бинарная переменная, равная 1, если выемка блока i произведена в период t , и 0 в противоположном случае; ${}^s q u_r^t$ — верхнее отклонение от производственной цели r в период t в модели залежи s ; $y u_r^t$ — стоимость производства единицы продукции ${}^s q u_r^t$ для наложения штрафа за избыточное производство; ${}^s q l_r^t$ — нижнее отклонение от производственной цели r в период t для модели рудного тела s ; $y l_r^t$ — стоимость производства единицы продукции ${}^s q l_r^t$ для наложения штрафа за дефицит производства; $Y l_j^t$ — число окружающих блоков, выемку которых не производили в период t или в период до выемки блока j . Окружающие блоки — это блоки (в количестве не меньше 3) в разных направлениях (рис. 1). Затраты c_{SM} — штрафные санкции относительно $Y l_j^t$.

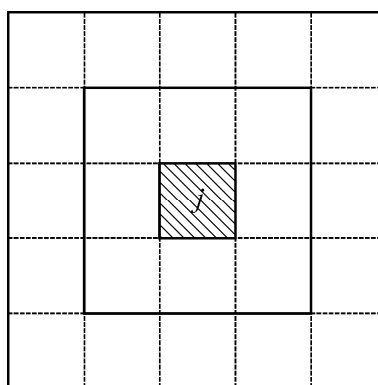


Рис. 1. Внутреннее и внешние окна вокруг блока j при ограничивающем факторе равномерной добычи [21]

Первое слагаемое целевой функции используется для максимизации дисконтированной экономической стоимости при общей оптимизации. Следует отметить, что в общем подходе к системе участков учитывается взаимосвязь между участками с целью максимизации использо-

вания ресурсов и общей ценности проекта. Первая часть (1) максимизирует локальный ЧДД для единичного участка с целью оценки оптимального развития рудника в рамках общего плана с учетом определяющих прибыль аспектов, например коэффициента вскрыши. Дисконтированная экономическая стоимость блока рассчитывается как прогнозируемая стоимость от каждой реализации. Вторая часть целевой функции касается отклонений от производственных целей для системы карьеров для каждой имитационной модели рудного тела s , включая качество всех компонентов и объем руды. При оптимизации относительно S возможных сценариев, полученных на основе многочисленных равновероятных моделей рудного тела, цель этой части целевой функции направлена на контроль неопределенности и изменчивости качества и объема добытой руды. Величина изменчивости качества в общем плане контролируется для каждого компонента e в определенный период t штрафными санкциями за отклонения ${}^s ql_r^t$ и ${}^s qu_r^t$. Отклонения для каждой цели и периода yu_r^t и yl_r^t вычисляются с ограничениями по качеству и объему руды. Третья часть целевой функции контролирует равномерность процесса добычи со штрафами за невыемку смежных блоков в период, когда запланирована выемка центрального блока (см. рис. 1). Здесь Yl_j^t — доля 8 непосредственно смежных блоков и 25 блоков, залегающих на расстоянии, равном ширине двух блоков, выемка которых не запланирована одновременно с блоком j . Отклонения от равномерной выемки каждого блока j в период t Yl_j^t оцениваются с учетом ограничений на равномерность выемки. Приоритеты трех конкурирующих частей целевой функции регулируются величиной соответствующих стоимостных параметров для каждой части относительно друг друга. Лицо, принимающее решение (ЛПР), регулирует эти параметры для разработки оптимального плана, соответствующего его целям, например установленному уровню риска.

Ограничения

Ограничение ресурсов: каждый блок i извлекается только однажды (в периоде t):

$$\sum_{t=1}^p x_i^t = 1. \quad (2)$$

Все вышележащие блоки m_i подлежат выемке до выемки данного блока i . Это можно продемонстрировать на конусных моделях бортов карьера. Одна из возможных формулировок имеет вид

$$m_i x_i^t - \sum_{l=1}^{m_i} \sum_{r=1}^t x_l^r \leq 0, \quad (3)$$

где l — счетчик для блоков, лежащих выше блока m_i .

Отклонения качества ${}^s qu_r^t$ от верхнего предела, ${}^s ql_r^t$ от нижнего предела для каждого компонента, период t и имитационная модель рудного тела s определены на основании ограничений качества:

$$\sum_{i=1}^n (g_{si}^e - G_{\max}^e) O_i x_i^t - {}^s qu_r^t = 0, \quad (4a)$$

$$\sum_{i=1}^n (g_{si}^e - G_{\min}^e) O_i x_i^t + {}^s ql_r^t = 0, \quad (4b)$$

где g_{si}^e — качество компонента e в блоке i в модели рудного тела s ; G_{\min}^e и G_{\max}^e — установленные минимальное и максимальное значения среднего качества компонента e в руде, обогащаемой в период t ; O_i — объем руды в блоке i .

Отклонения объема руды ${}^s qu_r^t$ от верхнего предела и ${}^s ql_r^t$ от нижнего предела для каждого периода t определяются как

$$\sum_{i=1}^n O_i x_i^t - qu_r^t = PC_{\max}, \quad (5a)$$

$$\sum_{i=1}^n O_i x_i^t + ql_r^t = PC_{\min}, \quad (5b)$$

где PC_{\min} и PC_{\max} — минимальный и максимальный объемы добычи руды, установленные с учетом мощности обогатительной фабрики.

Абсолютный объем переработанного материала, руды и породы в течение периода t моделируется через ограничение

$$\sum_{i=1}^n (O_i + W_i) x_i^t \leq MC_{\max}, \quad (6)$$

где W_i — объем породы в блоке i ; MC_{\max} — максимальная производительность добычи.

Основное требование к процессу добычи руды — доступ оборудования и его мобильность при равномерности добычи, которую определяет последовательность выемки. Процент отклонений от равномерной добычи в целевой функции Yl_j^t вычисляется с учетом ограничений

$$-\sum_{k=1}^{nb1} 2x_k^t - \sum 1x_k^t + (2nb1 + 1nb2)x_j^t - Yl_j^t \leq 0, \quad (7)$$

где $nb1$ — число непосредственно примыкающих блоков (внутреннее окно) относительно блока j , подлежащего выемке, а $nb2$ — число блоков на расстоянии ширины двух блоков относительно блока j (внешнее окно), как показано на рис. 1. За нарушение (7) для блока внутреннего окна штраф вдвое выше, чем для блока внешнего окна, следовательно, целесообразно производить выемку блока j одновременно с блоками внутреннего, а не внешнего окна. Несомненно, блоки внешнего окна могут отрабатываться вместе с блоком j , но гибкость программы позволяет осуществлять их выемку в другие периоды.

КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ РИСКА ОТНОСИТЕЛЬНО ВРЕМЕНИ

Как показано выше, штрафы, связанные с отклонением от производственных целей, вводятся в целевую функцию для контроля риска отклонения для каждого компонента. Эти штрафы выражены в различных единицах для каждого компонента и периода, что позволяет программно контролировать риск во времени. В понятии контроля риска во времени [21] использована дисконтная ставка геологического риска. Эта ставка непосредственно относится к штрафам и контролирует распределение риска по периодам. Высокая дисконтная ставка геологического риска указывает на то, что метод SIP должен планировать меньший риск в начальные, а не в более поздние периоды. Это имеет смысл, когда поставлена цель отработать участки месторождения с меньшим риском в начальный период, а участки с более высокой неопределенностью — позднее. В процессе отработки залежи в ходе эксплуатационной разведки неопределенность ин-

формации уменьшается. Дисконтная ставка геологического риска, равная 0 %, позволяет планировать один уровень риска во все периоды. Разность между штрафами, налагаемыми на верхние и нижние отклонения, определяет приоритет верхних и нижних отклонений относительно целей. Например, очень важно удержать дефицит производства на максимально низком уровне, в то время как избыток производства не имеет существенного значения.

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ YANDI CENTRAL 1 (ЗАПАДНАЯ АВСТРАЛИЯ)

Метод производственного планирования разработки использован на поликомпонентном железорудном месторождении Yandi Central 1 в Западной Австралии. В первой части дано описание месторождения Yandi Central 1, включая геологию, технологию разработки, текущий производственный план. Затем приведены формулировка проблемы и описание входных данных, в частности процесса производственного планирования единичной залежи с помощью стохастического метода для комплексного планирования работы рудника, состоящего из нескольких открытых участков. Ввод информации об имитационной модели рудного тела представляется в виде эксплуатационных, экономических и контролирующих риски параметров с последующей ее детализацией на месторождении Yandi Central 1, включая практическое применение метода ручного проектирования рудника для преобразования результатов в практический план. Результаты сравнения планов, разработанных с помощью стохастического метода и детерминистического подхода, показали преимущества стохастического метода.

РАБОТА РУДНИКА YANDI И ПРАКТИКА ТЕКУЩЕГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Месторождение Yandi Central 1 — это часть рукавообразной железорудной залежи (CID) Yandi вдоль системы Marillana–Yandicoonica Creek в 120 км к северо-западу от Ньюмана (Западная Австралия). Залежь разрабатывается совместным горнорудным предприятием Yandi, которое включает несколько открытых карьеров. Основная производственная цель комплекса – обеспечение поставки материала, отвечающего требованиям потребителя, при минимальной стоимости производства и оптимальном усреднении качества руды, произведенной в разных карьерах с широким диапазоном изменчивости качества ресурсов. Критические геохимические параметры руды месторождения представляют содержание железа (Fe), кремнезема (SiO_2), глинозема (Al_2O_3), фосфора (P), воды и органических компонентов, измеряемых как потери при прокаливании, поскольку они влияют на физические и химические свойства продукта, а также обогатимость руды.

С целью оптимизации работы СП Yandi, включающего систему карьеров, компания BHP Billiton's Technology Group разработала алгоритм планирования BLASOR [20]. BLASOR выражает производственные задачи в виде объема добытой руды за каждый период в каждом карьере как определенный вклад в общую цель. Используемый в данной работе BLASOR учитывает большое число компонентов на основе детерминированной модели рудного тела и не рассматривает локальную неопределенность и изменчивость качества запасов.

СПЕЦИФИКАЦИЯ МЕТОДА И ВВОДНЫЕ ДАННЫЕ ПРОГРАММЫ ПЛАНИРОВАНИЯ

Локальная изменчивость и отсутствие полной информации о пространственном распределении компонентов в рудной залежи являются критическими параметрами для соответствия спецификации материала, заявленной потребителем. Для включения локальной изменчивости

и неопределенности геохимических параметров в производственное планирование работы рудника можно использовать методы оптимизации при неопределенности. Стохастический метод производственного планирования работы Yandi Central 1 основан на стохастических имитационных моделях рудного тела, построенных компьютерным методом прямого блочного моделирования [22]. Ниже дано подробное описание эксплуатационных, экономических и контролируемых параметров.

Стохастические модели рудной залежи Yandi Central 1

Производственное планирование работы рудника при геологической неопределенности основывается на ряде имитирующих моделей рудной залежи. В данном случае использовано 20 имитирующих моделей рудного тела основной рудной зоны (ОРЗ), обобщенных в [22]. Эта комплексная имитация пяти компонентов — Fe, P, SiO₂, Al₂O₃ и органики — гарантирует локальное воспроизведение корреляции между компонентами. Важно отметить, что Fe сильно коррелирует с компонентами SiO₂ и Al₂O₃. Каждая из созданных моделей рудной залежи содержит 3.049 блоков размером 25×25×12 м как типовую единицу для отработки. Атрибуты каждого блока включают общий объем, объем руды, содержание Fe, P, SiO₂, Al₂O₃ и органики. В качестве примера на рис 2 представлена карта пространственного распределения содержания Fe в модели рудного тела для реализации № 5.

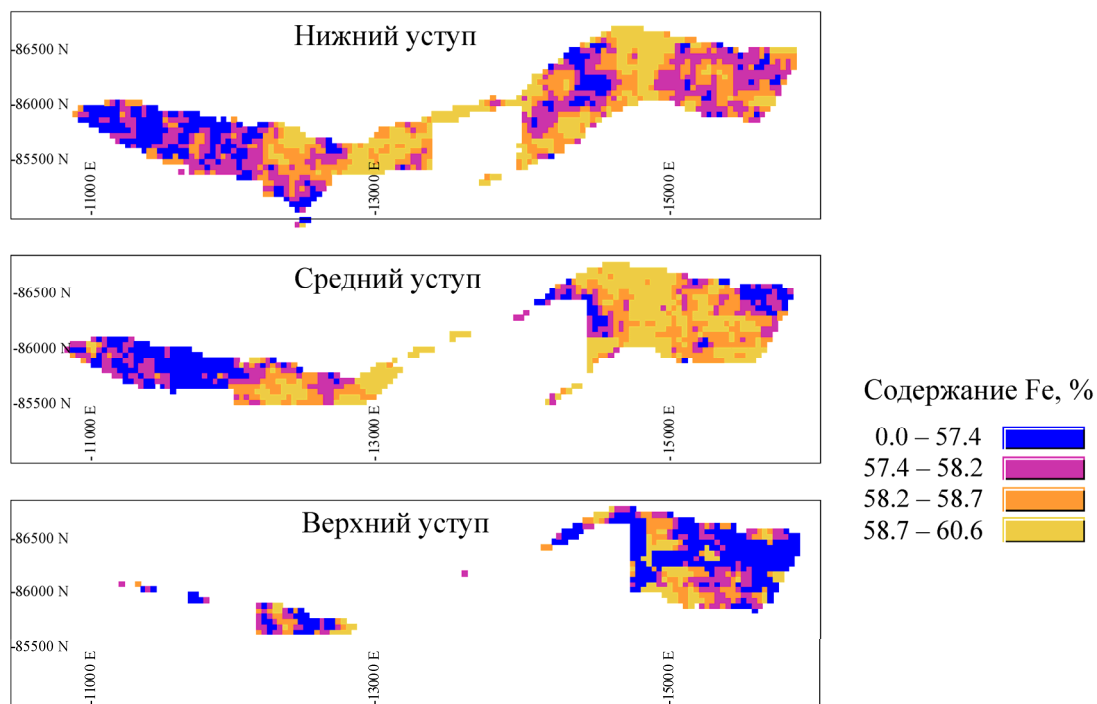


Рис 2. Пространственное распределение содержания Fe в модели № 5 для нижнего, среднего и верхнего уступов

Технологические параметры

BLASOR определяет технологические параметры производства руды определенного качества методом комплексного планирования работы системы карьеров. Компания BHP Billiton Iron Ore предоставляет результаты планирования, содержащие вклад Yandi Central 1 в дости-

жение общей цели в течение следующих пяти лет, рассматриваемых как плановые периоды (в табл. 1 приведены данные, масштабированные BLASOR в целях конфиденциальности).

ТАБЛИЦА 1. Объем руды и ограничения по качеству при планировании работы Yandi Central

(BLASOR: результаты планирования работы Yandi Central 1 в первые периоды)						
Номер периода	Объем руды (масса)	Fe, %	P, %	SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	ППП, %
1	14000000	57.1–59.4	0.032–0.038	4.6–5.2	0.90–1.05	9.5–11.0
2	10000000	57.1–59.4	0.032–0.038	4.6–5.2	0.90–1.05	9.5–11.0
3	10000000	57.1–59.4	0.032–0.038	4.6–5.2	0.90–1.05	9.5–11.0
4	9000000	57.1–59.4	0.032–0.038	4.6–5.2	0.90–1.05	9.5–11.0
5	7200000	57.1–59.4	0.032–0.038	4.6–5.2	0.90–1.05	9.5–11.0

Примечание: маргинальное качество руда/пустая порода — Fe ≥ 56 %.

Идеальный товарный продукт должен иметь нулевую изменчивость качества, но поскольку это практически невозможно, устанавливается диапазон изменчивости. Качество товарного продукта должно быть в рамках этого диапазона. В табл. 1 приведены данные исходного объема добычи руды и диапазон ее качества. До оптимизации содержание Fe 56 % является граничным значением для классификации добытого материала как руда/порода. Также предполагается, что процесс достаточно гибкий для того, чтобы учитывать разную производительность по руде и породе в разные периоды. Поэтому максимальная производительность добычи, включая руду и породу, установлена на уровне 20 млн т, или приблизительно на 5 млн т больше минимальной производительности. Пологое залегание месторождения позволило установить геотехнические ограничения. Генеральный угол откоса уступа равен 45°.

Экономические и контролирующие риски параметры

В табл. 2 обобщены экономические параметры: цена, стоимость добычи и обогащения, дисконтная ставка. Стоимость добычи включает стоимость взрывания, выемки и транспортировки. Стоимость обогащения — затраты на дробление, конвейерную транспортировку и складирование. Идентифицированы две дисконтные ставки: экономическая и геологическая. Экономическая дисконтирует движение ликвидности по периодам, а геологическая контролирует риск производства материала, качество которого выходит за рамки установленного диапазона качества по периодам. Извлечение составляет 100 %.

ТАБЛИЦА 2: Экономические параметры перспективного производственного планирования работы Yandi Central 1

Параметр	Стоимость/цена
Цена/тонна извлеченного металла, \$	30
Стоимость добычи на тонну, \$	5
Стоимость обогащения на тонну, \$	5
Экономическая дисконтная ставка, %	10
Геологическая дисконтная ставка, %	10

Метод стохастического планирования в данном случае рассматривает риск отклонения от производственных целей относительно качества продукции по содержанию компонентов при изначально установленном штрафе за отклонение 1 \$/единица отклонения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

Начальный этап и практическое планирование рудника

В верхней части рис. 3 показаны результаты начального этапа работы с вышеописанными параметрами. Последовательность выемки блоков — равномерная и доступная, но есть несколько блоков вокруг блоков, запланированных к выемке в разные периоды времени. При разработке практического плана добычи, обеспечивающего минимальную ширину добычи и доступность для оборудования, использованы результаты стохастического метода, адаптированные с помощью ручного проектирования рудника и строительства откаточного пути. Эти стандартные инструменты имеются в компьютерных программах планирования работы рудника. План, разработанный таким образом, можно использовать как основу для создания полигонов для каждого периода и уступа. Такие полигоны вместе с откаточными путями и скатами определяют структуру карьера на каждый период и обеспечивают производственную добычу руды. Параметры этого этапа проектирования: высота уступа 12 м, угол борта карьера 45° , ширина насыпи 5 м между подошвой и гребнем, ширина дороги 25 м и 8 % — уклон съезда. Юго-восточный изометрический вид полученного сглаживания на нижней части рис. 3 показывает, что этот тип сглаживания не оказывает существенного влияния на результаты, т. е. график сглаживания все еще остается близким к оптимальному.

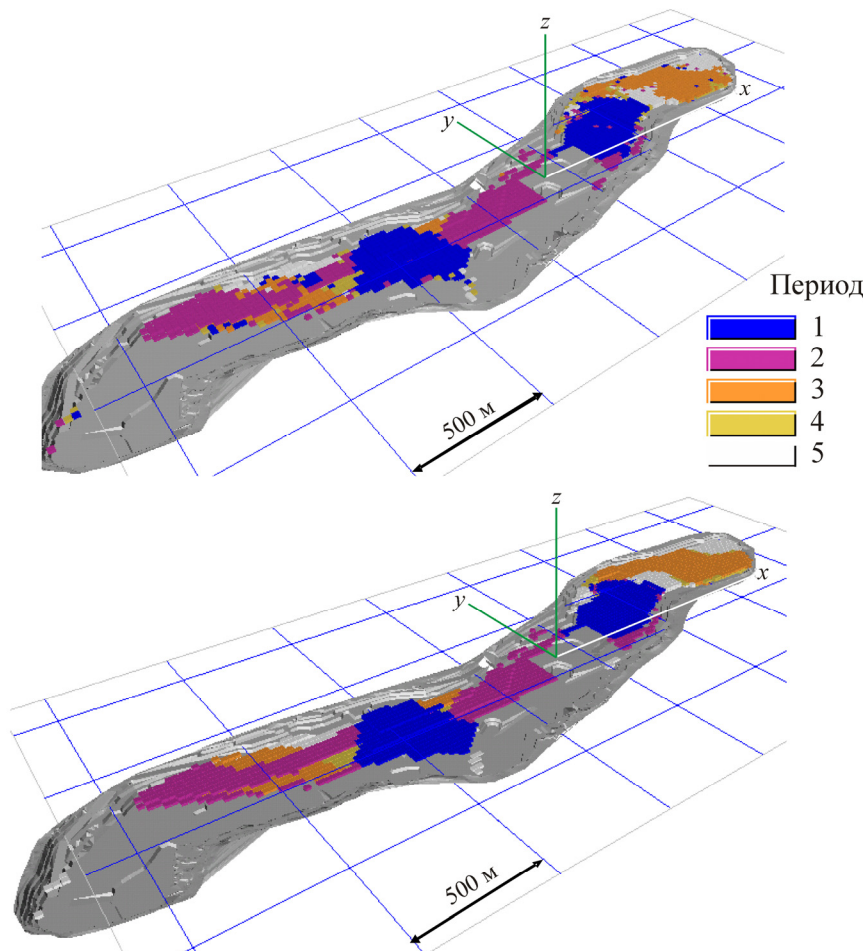


Рис 3. Стохастический план всего открытого карьера — до (верхняя часть) и после (нижняя часть) равномеризации с помощью ручного проектирования

Результаты оценки

Помимо объема добытой руды и пустой породы, получен профиль риска качества за оцениваемый период для Fe, SiO₂, Al₂O₃, P и ППП (рис. 4). Для каждого периода качество показано для каждой имитационной модели рудного тела, представляющей возможные сценарии на основе имеющейся информации. Размах вариантов реализации указывает неопределенность качества добытого материала в период извлечения согласно общему плану. Анализируя профиль риска для Fe, P и ППП, можно сделать вывод, что риск отклонения от производственных целей отсутствует. Ситуация с SiO₂ и Al₂O₃ оказалась иной, четыре из 20 имитационных моделей рудного тела указывают для SiO₂ отклонение от нижнего предела в период 1. Итак, имеется 20 %-я вероятность не выполнить производственные цели для SiO₂ в период 1.

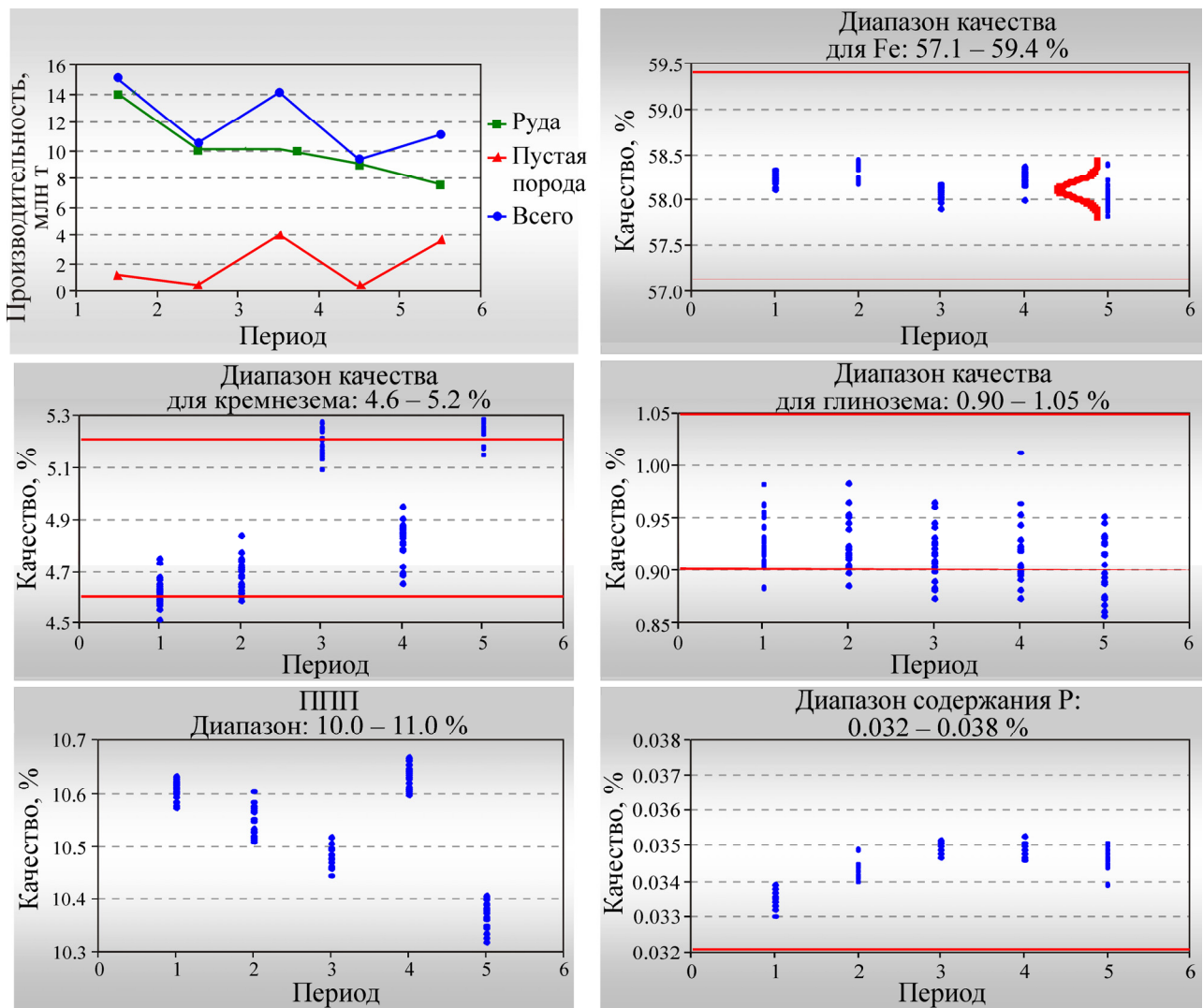


Рис. 4. Стохастическое планирование относительно объема руды и пустой породы и профилей риска для Fe, SiO₂, Al₂O₃, P и ППП на Yandi Central 1

Способность контроля риска

Предлагаемый метод планирования обеспечивает возможность контроля риска отклонения от производственных целей путем учета различных параметров качества. Аналогично начальному этапу SiO₂ и Al₂O₃ оказываются наиболее проблемными. Для изучения возможности сни-

жения риска были разработаны три плана с различными штрафами для обоих компонентов: низкий (1 \$/единица отклонения/т), средний (10 \$/единица отклонения/т) и высокий (100 \$/единица отклонения/т).

На рис. 5 показана последовательность выемки нижнего уступа по каждому плану. В каждом плане последовательность выемки залежи различна. Разброс вариантов плана усиливается относительно величины штрафов. При низких штрафных санкциях выемка осуществляется равномерно. Несмотря на то что средние штрафы инициируют определенный разброс, процесс выемки все еще можно отнести к равномерному, поскольку ручное проектирование позволяет сделать план более гибким. Высокие штрафы генерируют очень разбросанный план выемки, который можно охарактеризовать как трудный для эффективной практической реализации. Разброс — это индекс высокой селективности с целью производства однородного продукта с жестким контролем качества.

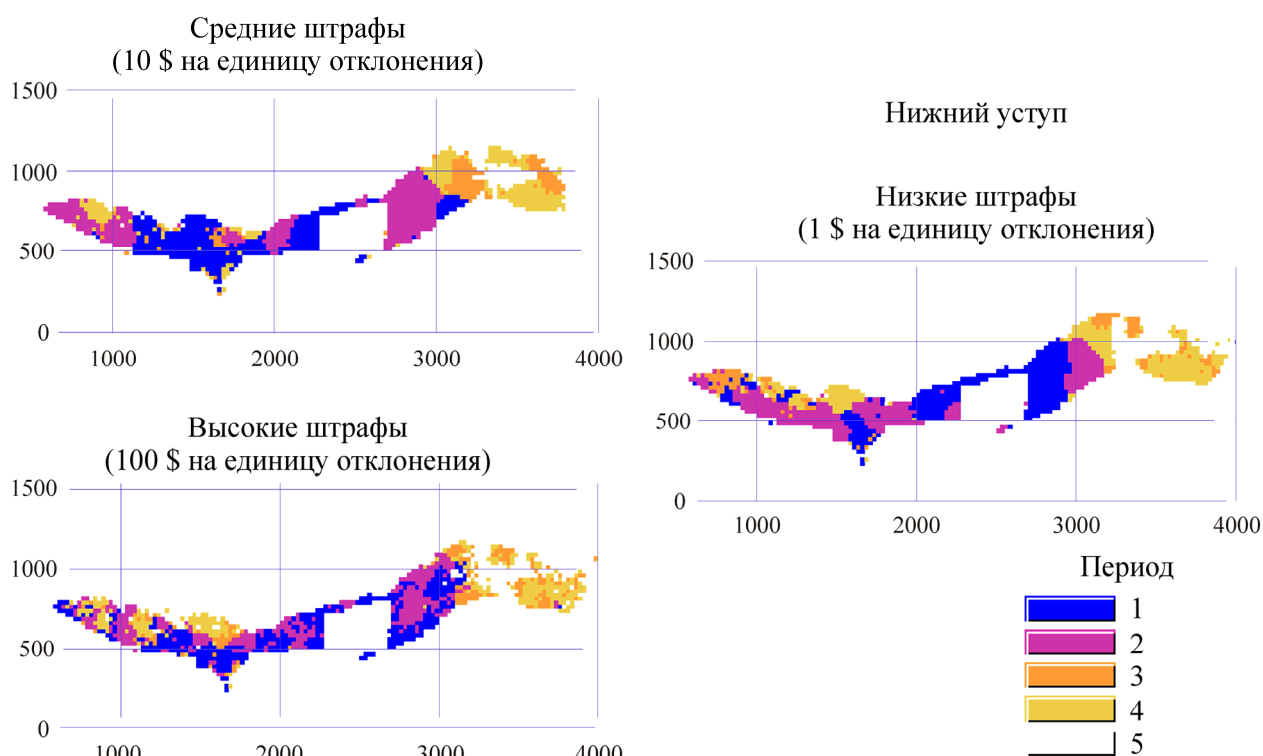
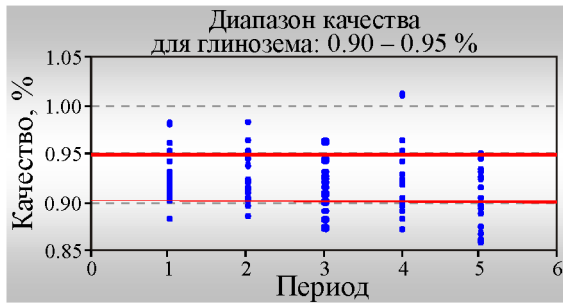


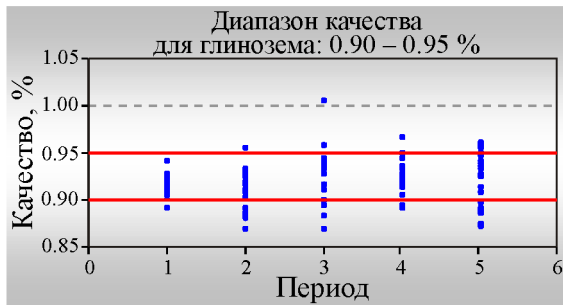
Рис. 5. Планы выемки нижнего уступа с учетом величины штрафных санкций

На рис. 6 показаны профили риска для SiO_2 и Al_2O_3 для трех вариантов общих планов. Для SiO_2 эффект повышения штрафов становится очевидным уже при их средних значениях. По сравнению со случаем с низким штрафом существенно снижаются колебания качества по периодам с небольшой вероятностью отклонения от целевого значения в периоды 2, 3 и 4. Повышенные штрафы улучшают результат только до уровня граничного значения. Для Al_2O_3 снижение вероятности отклонения от цели характерно для повышенных штрафов, хотя и с определенной степенью риска из-за высокой локальной изменчивости и неопределенности компонента, которые невозможно исключить путем усреднения качества материала в карьере. Возможным вариантом снижения риска является смешивание местной руды с рудой из других карьеров с более стабильным и менее неопределенным содержанием Al_2O_3 .

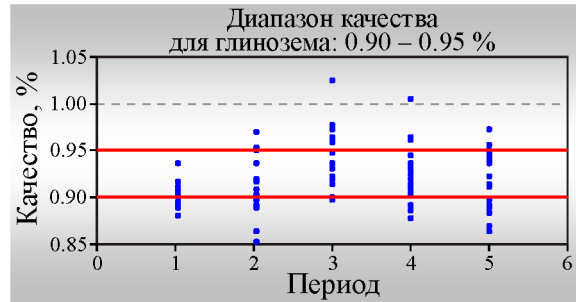
Средние штрафы (10 \$ на единицу отклонения)



Высокие штрафы (100 \$ на единицу отклонения)

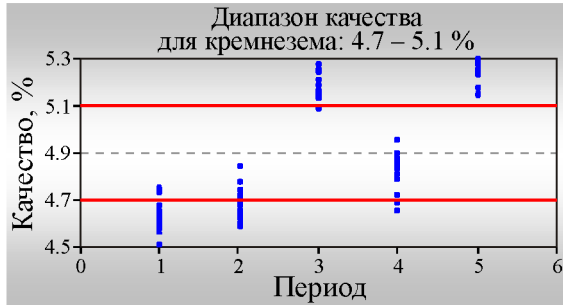


Низкие штрафы (1 \$ на единицу отклонения)

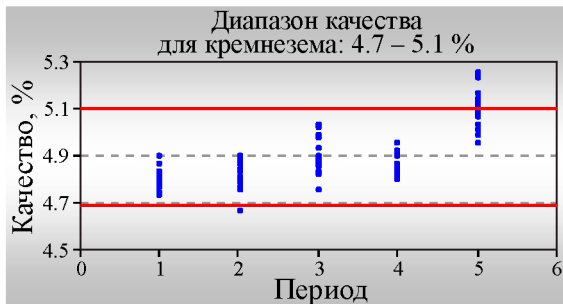


— Диапазон в SIP формулировке

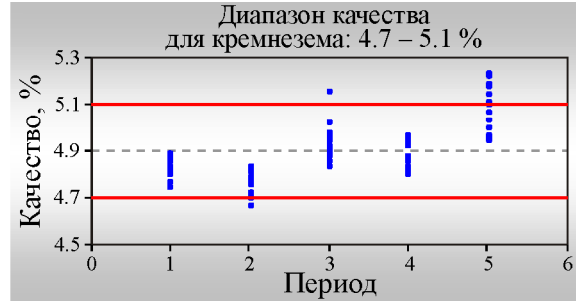
Средние штрафы (10 \$ на единицу отклонения)



Высокие штрафы (100 \$ на единицу отклонения)



Низкие штрафы (1 \$ на единицу отклонения)



— Диапазон в SIP формулировке

Рис. 6. Профиль риска качества относительно штрафных санкций (глинозем и кремнезем)

Обычно эта оценка формулировки планирования указывает, что риск отклонения снижается, а селективность повышается за счет двух конкурирующих целей в целевой функции: минимизация риска отклонения от производственных целей и равномерный производственный процесс.

СРАВНЕНИЕ С ТРАДИЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Преимущества стохастического моделирования продемонстрированы путем сравнения двух производственных планов: один стохастический план разработан с использованием 20 имитирующих моделей рудного тела и второй план разработан на основе одной модели рудно-

го тела среднего типа, известной как модель типа Е. Модель типа Е рассчитывается путем усреднения данных блока для 20 смоделированных рудных тел для каждого компонента. Этот метод планирования с параметрами, сравнимыми со стохастическим методом, генерирует план типа Е. На рис. 7 показана последовательность выемки для стохастического плана и плана типа Е для нижнего уступа. Для обоих планов характерна относительно равномерная последовательность, которую можно реализовать на практике после ручного проектирования рудника открытого типа.

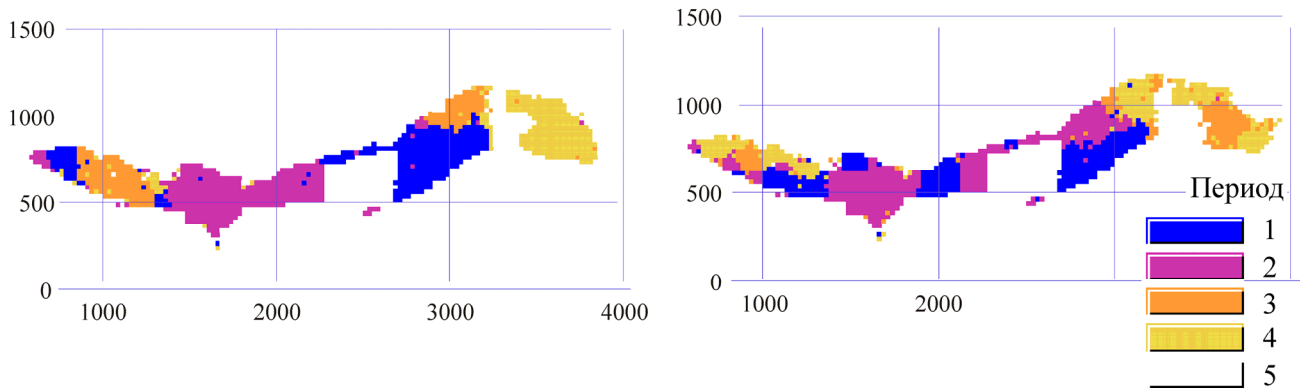


Рис. 7. Последовательность выемки по стохастическому плану (слева) и по плану типа Е (справа)

На рис. 8 представлены профили риска для критических компонентов SiO_2 или Al_2O_3 согласно обоим планам. Очевидно, что план типа Е не способен учитывать геологическую неопределенность, хотя средние значения содержания компонентов, полученные в данном периоде, рассматриваются в пределах производственных целей и существенные отклонения от верхнего и нижнего производственного диапазона хорошо отслеживаются для SiO_2 или Al_2O_3 .

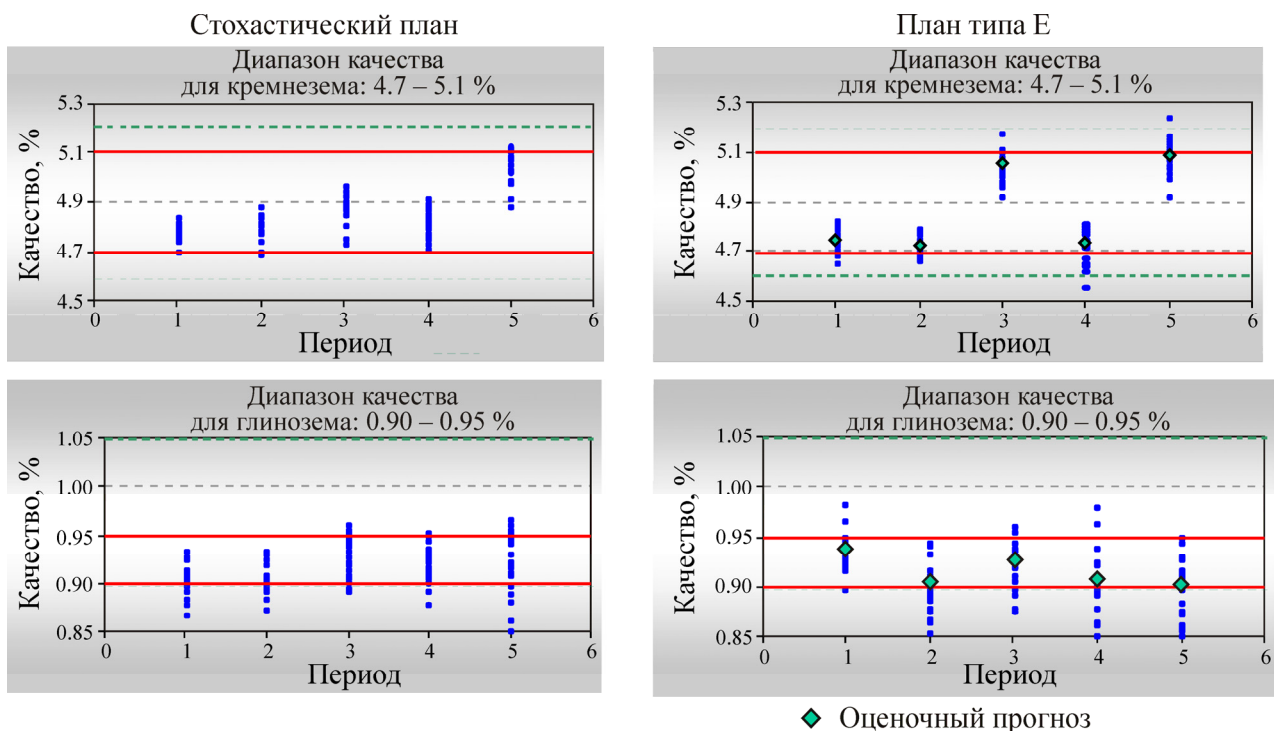


Рис. 8. Профиль риска по качеству для кремнезема и глинозема по стохастическому плану (слева) и по плану типа Е (справа)

В стохастическом плане SiO_2 незначительно отклоняется в периоды 2 и 5 с вероятностью 5 и 20 % соответственно. План типа E указывает на отклонения SiO_2 от целей в каждый период со средней вероятностью 30 %. Вероятность отклонения от верхнего и нижнего пределов почти в 2 раза выше в плане типа E по сравнению со стохастическим планом особенно для Al_2O_3 .

ВЫВОДЫ

Новый метод производственного планирования на основе стохастического целочисленного программирования, учитывающий совместную поликомпонентную геологическую неопределенность, представлен и успешно используется для производственного планирования работы рудника Yandi Central 1 в Западной Австралии. Показано, что SIP можно применять как часть метода планирования работы рудника, состоящего из нескольких открытых карьеров. В этом случае BLASOR результаты и метод оптимизации планирования работы системы карьеров используют для определения вклада рудника Yandi Central 1 в достижение общей производственной цели относительно качества продукции по ценным компонентам и объема производства руды.

Полученные результаты указывают на возможность с помощью стохастического метода контролировать риск отклонения от производственных целей для критического содержания основных ценных компонентов. Сравнение стохастического производственного плана и плана, разработанного с использованием детерминированной модели рудного тела, показывает преимущество стохастических моделей. Стохастический план указывает на более высокую вероятность соответствия производственным целям, что снижает общий риск проекта и повышает его ценность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **David M.** Geostatistical ore reserve estimation, Elsevier, Amsterdam, 1977.
2. **David M.** Handbook of applied advanced geostatistical ore reserve estimation, Elsevier, Amsterdam, 1988.
3. **Goovaerts P.** Geostatistics for natural resources evaluation, Oxford University Press, New York, 1997.
4. **Rondon O.** Teaching aid: minimum/maximum autocorrelation factors for joint simulation of attributes, *Mathematical Geosciences*, 44, 2012.
5. **Dimitrakopoulos R.** Risk analysis in ore reserves and mine planning: Conditional simulation concepts and applications for the mining industry, AusIMM-McGill 2007 Professional Development Seminar Series, 2007.
6. **Ravenscroft J. P.** Risk analysis for mine scheduling by conditional simulation, *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, Section A*, 101, 1992.
7. **Dowd P. A.** Risk in minerals projects: analysis, perception and management, *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, 106, 1997.
8. **Dimitrakopoulos R., Farrelly C. T., and Godoy M. C.** Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design, *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, 111, 2002.
9. **Godoy M. C. and Dimitrakopoulos R.** Managing risk and waste mining in long-term production scheduling, *SME Transactions*, 316, 2004.
10. **Leite A. and Dimitrakopoulos R.** A stochastic optimization model for open pit mine planning: Application and risk analysis at a copper deposit, *IMM Transactions, Mining Technology*, 116, 2007.
11. **Albor F. and Dimitrakopoulos R.** Stochastic mine design optimization based on simulated annealing: Pit limits, production schedules, multiple orebody scenarios and sensitivity analysis, *IMM Transactions, Mining Technology*, 118, 2009.

12. **Birge J. R. and Louveaux F.** Introduction to stochastic programming, Springer-Verlag, New York, 1997.
13. **Ramazan S. and Dimitrakopoulos R.** Production scheduling with uncertain supply: a new solution to the open pit mining problem, Optimization and Engineering, DOI 10.1007/s11081-012-9186-2, 2012.
14. **Dimitrakopoulos R.** Stochastic optimization for strategic mine planning: a decade of developments, Journal of Mining Science, 47, 2011.
15. **Albor F. and Dimitrakopoulos R.** Algorithmic approach to pushback design based on stochastic programming: method, application and comparissons, IMM Transactions, Mining Technology, 119, 2010.
16. **Lamghari A. and Dimitrakopoulos R.** A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty, European Journal of Operational Research, 222, 2012.
17. **Asad M. W. A. and Dimitrakopoulos R.** Implementing a parametric maximum flow algorithm for optimal open pit mine design under uncertain supply and demand, Journal of the Operational Research Society, DOI:10.1057/jors.2012.26, 2012.
18. **Whittle G.** Global asset optimization. Orebody Modelling and Strategic Mine Planning: Uncertainty and Risk Management Models, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Spectrum Series 14, 2nd Edition, 2007.
19. **Goodfellow R. and Dimitrakopoulos R.** Algorithmic integration of geological uncertainty in pushback designs for complex multiprocess open pit mines, IMM Transactions, Mining Technology, 122, 2012.
20. **Stone P., Froyland G., Menabde M., Law B., Pasyar R. and Monkhouse P.** Blasor — blended iron ore mine planning optimization at Yandi, Orebody Modelling and Strategic Mine Planning: Uncertainty and Risk Management Models, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Spectrum Series 14, 2nd Edition, 2007.
21. **Dimitrakopoulos R. and Ramazan S.** Uncertainty based production scheduling in open pit mining, SME Transactions, 316, 2004.
22. **Boucher A. and Dimitrakopoulos R.** Multivariate Block-Support Simulation of the Yandi Iron Ore Deposit, Western Australia, Mathematical Geosciences, 44, 2012.
23. **Benndorf J.** Efficient sequential simulation methods with implications on long-term production scheduling, Unpublished MPhil thesis, The University of Queensland, Brisbane, 2005.

Поступила в редакцию 30/X 2012