



УДК 624.073.1: 622.834: 622.13

**А.И. Барулин**

АО «ССГПО», г. Рудный

**З.Р. Рахимов**

РГКП «Рудненский индустриальный институт», г. Рудный

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ НАГРУЖЕННОГО ОТКОСА В МАССИВЕ ПЛАСТИЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД  
ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ**

Сложность обеспечения устойчивости откоса в массиве пластичных пород обусловлена не только их относительно невысокой прочностью, но и снижением несущей способности пород с увеличением влажности и во времени. Огибающая кругов Мора на паспорте прочности пластичных глинистых пород криволинейна и не может быть описана только параметрами сцепления ( $c$ ) и угла внутреннего трения ( $\phi$ ), как для большинства горных пород, что затрудняет применение классических методов оценки устойчивости откосов. В отличие от упругих свойств горных пород, обеспечивающих практическое полное восстановление исходного напряженного состояния объекта после снятия нагрузок, пластическое деформирование существенно замедляется, но не прекращается. В связи с этим, размещение внешних отвалов в непосредственной близости от верхней бровки откоса, сложенного глинистыми горными породами с сильно выраженными пластическими свойствами, может быть рекомендовано как крайняя мера.

Проблема оценки устойчивости нагруженного откоса пластичных горных пород решалась нами в связи с оползнем борта разрезной траншеи при вскрытии карьера № 6 Восточно-Аятского месторождения бокситов АО «Алюминий Казахстана». Недостаточная несущая способность уступов верхних горизонтов ставила под сомнение возможность применения прогрессивной и экономичной бестранспортной системы разработки данного карьера. На рис. 1 показана схема оползня, произошедшего 23 декабря 2005 года при высоте откоса разрезной траншеи  $H = 15$  метров и угле наклона  $\alpha = 25^\circ$ .

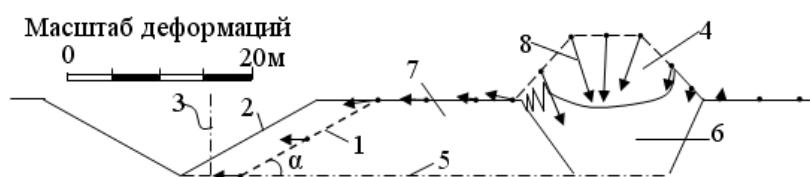


Рис. 1. Деформирование нагруженного откоса: 1, 2 - контур массива разрезной траншеи до и после оползня, соответственно; 3 – ось разрезной траншеи, 4 – внешний отвал; 5 – плоскость предполагаемого контакта; 6 – призма активного давления, 7 – призма упора; 8 – деформации поверхности откоса по данным маркшейдерских съемок.

На первый взгляд этот оползень может быть охарактеризован как контактный, когда

объем призмы активного давления оползневого тела возрос за счет пород отвала, складированных на удалении 40–50 метров от верхней бровки уступа, под их давлением было преодолено сопротивление призмы упора и уступ сдвинулся в сторону выработанного пространства по слабому слою на 12...15 метров с практически полным погружением пород внешнего отвала. Это предположение хорошо согласуется с деформациями поверхности откоса, полученными посредством маркшейдерских измерений положения реперов наблюдательной станции.

Изучение геологического строения откоса показало, что он сложен тремя типами пород. У земной поверхности залегают четвертичные суглинки, мощностью 4–8 метров, непосредственно под ними – толща выветренной чеганской глины, мощностью 14–18 метров, а ниже – чеганская глина. Исследование поверхности контакта выветренных и невыветренных чеганских глин по данным геологической разведки показало, что в районе оползня эта поверхность имеет небольшой уклон, около  $2^{\circ}$ , в обратном от падения откоса направлении.

Для лабораторных исследований были отобраны образцы всех трех типов пород и поверхности предполагаемого слабого контакта. Образцы отбирались вдавливанием колец сдвигового прибора в массив горных пород и герметично упаковывались. Образцы перед испытанием уплотнялись 3 суток в фильтрационно-компрессионном приборе конструкции института «Гидропроект» под водой. Исследование пород выполнялось на сдвиг, сжатие и разрыв по стандартным методикам и на стандартном оборудовании. Влажность пород определялась перед уплотнением образцов и после их испытания. Естественная влажность чеганской глины составляла 8...9 %, четвертичного суглинка – 12...13 % и выветренной чеганской глины - 21...23 %. Испытания показали, что у двух типов пород пластические свойства выражены слабо и в диапазоне действующих в откосе напряжений их паспорта прочности могут быть аппроксимированы прямыми линиями с параметрами:  $c = 0,024 \text{ МПа}$ ,  $\phi = 23^{\circ}$  для четвертичного суглинка и  $c = 0,044 \text{ МПа}$ ,  $\phi = 22^{\circ}$  – для невыветренной чеганской глины. Паспорт прочности выветренной чеганской глины (рис. 2, а) имеет значительную кривизну, при этом в области нормальных напряжений, действующих в откосе, сцепление возрастает от 0,065 до 0,15 МПа, а угол внутреннего трения снижается с  $23$  до  $0^{\circ}$ . При нормальном напряжении  $\sigma > 0,3 \text{ МПа}$  сдвигающее напряжение  $\tau$  плавно снижается и стабилизируется при  $\sigma \geq 0,5 \text{ МПа}$ .

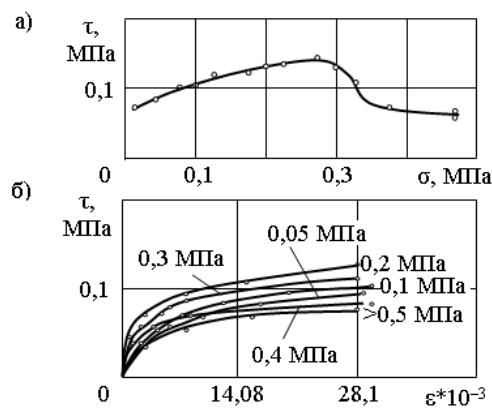


Рис. 2. Паспорта прочности (а) и деформируемости (б) чеганской выветренной глины

Такое поведение характерно для пластичных глинистых пород при нарушении их внутренней структуры, но происходит оно, как правило, при большей влажности и при больших на порядок нормальных напряжениях. Уникальность данного оползня определялась высокой нелинейностью свойств именно чеганской глины, поскольку исследование прочности отобранных образцов предполагаемого слабого контакта из основания оползневого тела показало, что они имеют свойства, идентичные выветренной чеганской глине.

Следовательно, никакого слабого контакта в основании оползня не было. Существенные пластические свойства чеганской выветренной глины хорошо видны на паспорте деформируемости (рис. 2, б).

Для расчета устойчивости откоса, сложенного пластичными породами, наиболее приемлемым следует признать метод конечных элементов [1]. Этот численный метод позволяет производить вычисления с учетом динамического изменения свойств пород объекта и учитывать сколь угодно сложную геологическую структуру породного массива.

Первоначально влияние нагрузки от внешних отвалов на устойчивость уступа исследовалось по математической модели, используемой нами ранее для оценки устойчивости ненагруженного откоса разрезной траншеи карьера № 6 Восточно-Аятского месторождения бокситов [2]. Поскольку мы имели данные маркшейдерских наблюдений за оползневым участком, то целью наших исследований на первом этапе было получение деформированного состояния контура откоса, сопоставимого с результатами натурных наблюдений. Выполненные методом конечных элементов расчеты (рис. 1) оползня показали, что приведшая к обрушению удельная внешняя нагрузка  $q = 0,32$  МПа не является для данной математической модели откоса критической. С целью определения предельной несущей способности откоса решение было выполнено посредством увеличения значения удельной внешней нагрузки. Потеря устойчивости идентифицирована при величине  $q = 0,72$  МПа. Такой существенный запас устойчивости нельзя объяснить низкой точностью определения физико-механических свойств пород, слагающих откос, или недостоверными сведениями о геологическом строении массива. Отличие реального и расчетного деформированного состояния контура откоса указывало на несоответствие механизмов его обрушения. В предложенной математической модели конечные элементы могли изменять свою форму, но не могли разрушаться, то есть терять связь друг с другом вдоль определенных критических направлений – поверхностей скольжения.

Очень важной составляющей метода конечных элементов является разработка математической модели объекта, отвечающей условиям деформирования реального откоса, так как в этом методе решение может быть найдено и при некорректно математически и физически поставленной задаче. Модель должна не только соответствовать геометрической форме и структуре объекта, но и физическим процессам ее деформирования. Для достижения максимального соответствия была построена математическая модель откоса на основе механики разрушения (рис. 3). При разбивке геометрически подобного объекту участка массива горных пород было отдано предпочтение регулярной сетке конечных элементов, позволяющей плавно передавать напряжения и деформации от одного к другому конечному элементу. Недостаток такой математической модели, заключающийся в слишком высоком порядке, описывающей равновесное состояние объекта системы линейных уравнений, легко устраним использованием эффективного алгоритма ее решения и возросшей производительностью современных персональных компьютеров. Для решения

систем линейных уравнений высокого порядка в программе SW нами использован метод Холецкого, позволяющий выполнять исключение неизвестных только с поддиагоналями ненулевых коэффициентов симметричной матрицы жесткости системы. Для снижения влияния машинного округления на точность вычислений все математические операции выполнялись с удвоенной компьютерной точностью.

Приведенная на рис. 3 математическая модель откоса состоит из 1673 узлов, 2718 конечных и 197 контакт-элементов. Верхняя и нижняя плоскости контакт-элемента – это грани двух конечных элементов, и его назначение – поддерживать или блокировать физико-механическое взаимодействие между ними. Контакт-элементы позволяют осуществлять решение задач механики разрушения с разрывом сплошности среды [3]. Положение плоскостей контакт-элементов, показанных на рис. 3 утолщенными линиями, определено методом перпендикуляров по направлениям векторов деформации откоса, полученных из маркшейдерских наблюдений. Для нахождения наиболее напряженной поверхности скольжения в откосе и более плавной передачи напряжений и деформаций между конечными элементами через контакт-элементы, параллельно основной поверхности скольжения проведено еще две, выше и ниже последней.

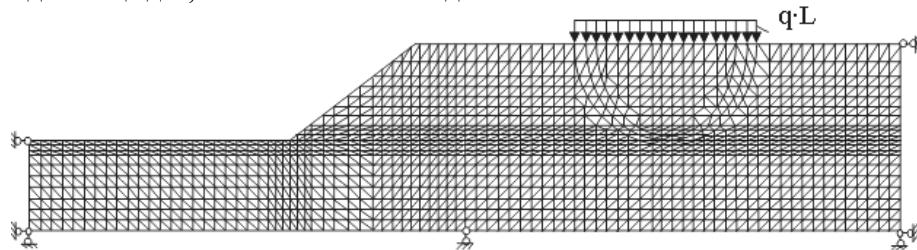


Рис. 3. Математическая модель нагруженного откоса на основе механики разрушения

Чтобы искусственно введенные в модель сплошной среды контакт-элементы не влияли на устойчивость объекта, вначале им назначаются свойства, соответствующие прочности окружающих их пород. Нахождение равновесного состояния нагруженного откоса заключается в подборе значений модулей Юнга ( $E$ ) для каждого из конечных элементов, чтобы их напряженно-деформированное состояние соответствовало реальным горным породам. Подбор модулей Юнга выполнялся методом переменных модулей [1]. После каждого шага расчета напряженно-деформированного состояния откоса в программе SW выполняется анализ состояния каждого из слагающих откос конечных элементов. С этой целью по вычисленным методом конечных элементов значениям действующих в элементе осевых напряжений ( $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ ) и относительных деформаций ( $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{yx}$ ), в соответствии с теорией предельного состояния Кулона–Мора, находится угол наклона наиболее напряженной площадки скольжения ( $\alpha$ ) и действующие на ней нормальное ( $\sigma_i$ ) и касательное ( $\tau_i$ ) напряжения (рис. 4).

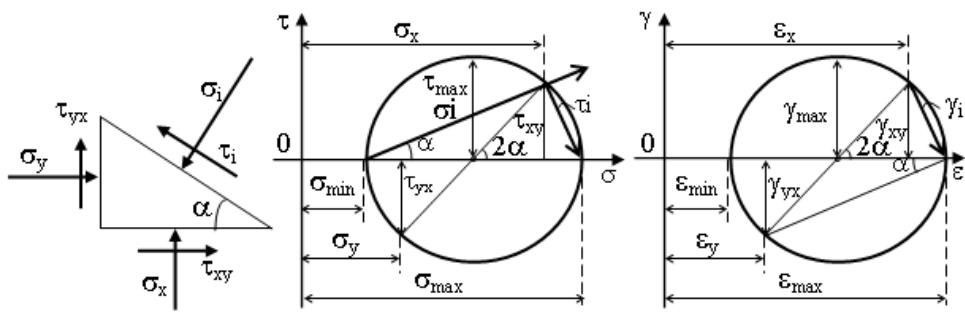


Рис. 4. Определение механического состояния конечного элемента  $i$

Вычисленные значения  $\sigma_i$ ,  $\tau_i$  и сдвиг  $\gamma_i$  проверяются на предмет соответствия напряженно-деформированному состоянию реальной породы. С этой целью программа SW оценивает положение точки  $i$  на паспорте деформируемости породы (рис. 5). Если напряжено-деформированное состояние конечного элемента не соответствует состоянию реальной горной породы, то есть точка  $i$  располагается выше линии предельного состояния при нормальном напряжении ( $\sigma_i$ ), то вычисляется новое значение модуля Юнга ( $E_{j+1}$ ). Если хотя бы состояние одного конечного элемента не соответствует реальному, то расчет по методу конечных элементов повторяется для новых значений модулей Юнга.

Только если найдено равновесное состояние откоса, начинается проверка напряженно-деформированного состояния контакт-элементов в соответствии с моделью состояния, показанной на рис. 6.

Физико-математическая модель контакт-элемента, имитирующего поверхность отдельности, была впервые предложена в работе [3]. При использовании этой модели контакт-элемента нами была заменена линейная зависимость между касательным напряжением ( $\tau$ ) и относительным смещением ( $\gamma$ ) на серию нелинейных, полученных при испытании образцов пород на сдвиг (рис. 2, б), для соответствующих значений нормальных напряжений. Подбор нормальной ( $K_N$ ) и касательной ( $K_S$ ) жесткостей контакт-элементов, соответствующих паспорту реальной породы, производился так же как и для конечных элементов модулей Юнга. С этой целью вычислялись относительные смещения краев контакт-элементов ( $\epsilon_S$ ,  $\epsilon_N$ ) по разности перемещений узлов, образующих его верхнюю ( $u_1, v_1, u_2, v_2$ ) и нижнюю плоскости ( $u_3, v_3, u_4, v_4$ ).

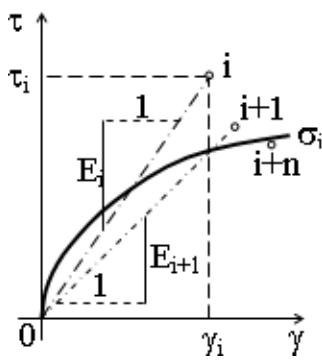


Рис. 5. Определение значения модуля Юнга

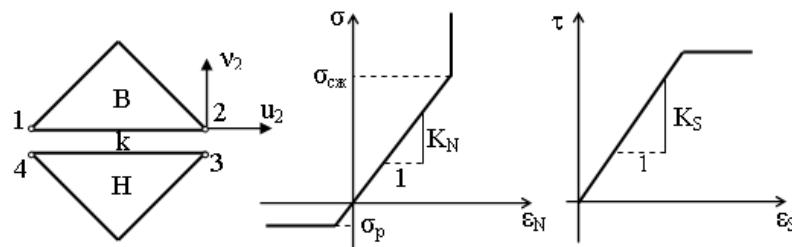


Рис. 6. Определение состояния контакт-элемента  $k$ : В, Н – верхний и нижний конечные элементы; 1, 2, 3, 4 – узлы верхней и нижней плоскостей контакт-элемента;  $u_2, v_2$  – перемещения узла 2 вдоль осей  $x$  и  $y$ ;  $K_S, K_N$  – параметры касательной и нормальной жесткости контакт-элемента;  $\sigma_{сж}$ ,  $\sigma_p$  – предельное напряжение на сжатие и разрыв контакта

Расчет напряжений, действующих в плоскости контакт-элемента, осуществляется по формулам:

$$\sigma = k_N \varepsilon_N; \quad \tau = k_S \varepsilon_S.$$

Если рассчитанные значения действующих напряжений ( $\sigma$  и  $\tau$ ) больше реально возможных, то значения коэффициентов жесткости контакт-элемента уменьшаются в соответствии с паспортом деформирования реальной глины.

Вычисление методом конечных элементов, с учетом имитации поверхностей скольжения контакт-элементами, значение критической внешней нагрузки составило 0,45 МПа, что на 40 % больше реальной при удовлетворительном соответствии деформаций контура откоса с данными натурных маркшейдерских наблюдений. Такое существенное отклонение вычисленной критической нагрузки от действия внешнего отвала можно было объяснить только проявлением ползучести пластичных выветренных чеганских глин, так как перед обрушением откоса отвальных массы пролежали на его поверхности 29 дней. С целью изучения проявления реологических свойств чеганской выветренной глины нами был выполнен анализ снижения их несущей способности в зависимости от времени действия внешних нагрузок.

Для исследования реологических свойств отобранные на карьере в кольца образцы чеганской выветренной глины уплотнялись в компрессионно-фильтрационном приборе под водой в течение 3 суток под действием нормальной нагрузки  $\sigma=0,3$  МПа. Затем образец помещали в сдвиговой прибор ПСГ-1, герметично упаковывали в полиэтиленовый мешок, предварительно уложив в него увлажненную губку для поддержания влажности. Прикладывали нормальную нагрузку  $\sigma=0,3$  МПа, а значение касательной нагрузки увеличивали от нуля до  $\tau_0$ , величина которой была меньше на 10% предельной сдвигающей нагрузки  $\tau_p$ , полученной при быстром сдвиге (рис. 2, а). Наблюдение за скоростью сдвига производили по индикатору часового типа. Чтобы точно определить момент сдвига, использовали систему видеонаблюдения в составе видеокамеры TCD-7012/4 и блока записи данных на жесткий диск Tedd TDVR2. Угол обзора и разрешение камеры позволяли записывать не только состояние образца, но и отсчет по индикатору часового типа. При частоте записи 1 кадр в секунду система видеонаблюдения сохраняет данные на жестком диске за 32 дня. С периодичностью один раз в неделю проверяли состояние образца, при необходимости увлажняя губку.

После обрушения образца определяли, просматривая записанное на жесткий диск изо-

бражение, смещение  $\varepsilon$  и время сдвига  $t$ . Затем значение  $\tau_0$  уменьшали еще на 10 % и повторяли эксперимент, целью которого было нахождение величины  $\tau_0$ , обеспечивающей несущую способность на протяжении 30 дней. При приближении к интересуемому интервалу времени, величину  $\tau_0$  уменьшали на вдвое меньший интервал. Полученные результаты, представленные на рис. 7, свидетельствуют о том, что такое значение равно  $0,67 \tau_{\text{ПР}}$ .

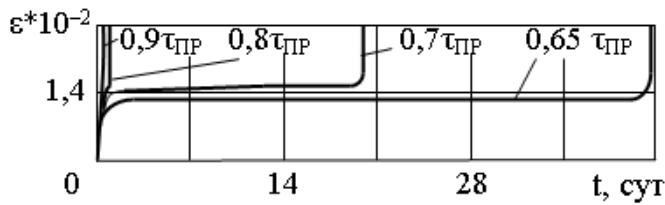


Рис. 7. Исследование потери несущей способности выветренной чеганской глины во времени  $t$

Для получения реологического паспорта деформируемости выветренных чеганских глин выполнили модификацию данных, полученных при их испытании быстрым сдвигом. Результаты расчета устойчивости нагруженного откоса, выполненного методом конечных элементов (рис. 8), с учетом реологических свойств показали полную идентичность вычисленного деформированного состояния откоса, с реально наблюдаемым на карьере. Полученная методом конечных элементов предельная несущая способность откоса на 2 % ниже реальной и объясняется погрешностями вычислений, определения физико-механических свойств пород, геологического строения массива, подсеченного откосом, и т.п.

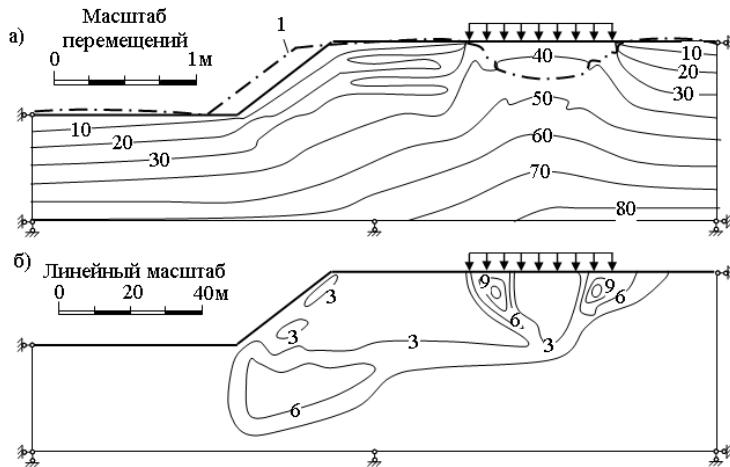


Рис. 8. Напряженно-деформированное состояние нагруженного откоса пластичных пород, вычисленное методом конечных элементов: 1 – контур деформированного откоса, а) изолинии максимальных  $\sigma_{\text{max}}$ ; б) изолинии минимальных  $\sigma_{\text{min}}$  главных напряжений

Вычисленные деформации контура откоса, показанные на рис. 8, а штрихпунктирной линией, в несколько раз меньше реально измеренных на карьере, но для их повторения необходимо было бы усложнить модель среды, придав ей дилатантные свойства, т.е. возможность деформирования конечных элементов с изменением их объема [4]. Однако эта

задача вряд ли имеет практический интерес.

Анализ поля максимальных напряжений, действующих в массиве откоса, показывает, что под внешними отвалами формируется широкая зона сжатия, а между ней и поверхностью откоса – область разгрузки. Поле минимальных главных напряжений практически повторяет очертания имитированных контакт-элементами поверхностей скольжения, а на рис. 8, б четко видны контуры призм упора и активного давления.

Добившись удовлетворительного соответствия между реальным и расчетным напряженно-деформированным состоянием, нагруженного внешним отвалом массива горных пород, в непосредственной близости от откоса разрезной траншеи нами была выполнена оценка его несущей способности, в зависимости от удаления отвалов от верхней бровки откоса. Расчет выполнялся методом конечных элементов посредством увеличения расстояний вдоль земной поверхности. Алгоритм программы был дополнен процедурой, которая удлиняла математическую модель в трех зонах: от верхней бровки до подошвы отвала, по ширине отвала и между отвалом и правой границей модели. Ширина отвала определялась углами естественного откоса отсыпаемых в него пород ( $35^\circ$ ) и максимальной высотой в 30 метров.

Рассчитанный график зависимости предельной несущей способности откоса ( $q$ ) от ширины бермы безопасности ( $g$ ) показан на рис. 9. На нем кривая 1 соответствует несущей способности в течение не более 1 месяца, а кривая 2 – нагрузке без ограничения срока, т.к. она не приводит к ползучести пород откоса.

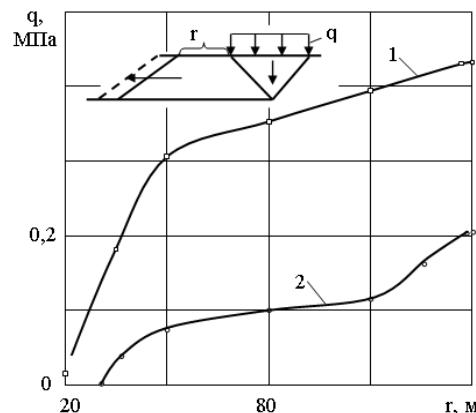


Рис. 9. Предельная несущая способность массива вблизи откоса: 1 – при  $0,67 \tau_{\text{пр}}$  (для рассмотренного случая оползня); 2 – при  $0,5 \tau_{\text{пр}}$  (постоянный отвал).

Оптимальным коэффициентом перезасыпки пород непосредственно в отвал следует признать значение не меньшее двух. Для обеспечения устойчивости верхних уступов карьера № 6 и успешного применения без транспортной технологии его разработки, на верхнем уступе всегда должен работать драглайн. Он необходим для перезасыпки пород на удаление, исключающее их негативное воздействие на устойчивость верхних уступов борта, особенно поставленных на проектный контур.

## Список литературы

1. Ержанов Ж. С. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород /Ж.С. Ержанов, Т.Д. Каримбаев. - Алма-Ата: Наука, 1975. - 238 с.
  2. Барулин А. И. Оценка устойчивости откосов слабых горных пород методом конечных элементов / А.И. Барулин, З.Р. Рахимов // Труды университета. - Караганда: Караганда: КарагТУ, 2006.- № 4. - С. 26-31.

3. Ngo D., Scordelis A. C. Finite element analysis of reinforced concrete beams. - Journal of the American Concrete Institute, 1967. - Vol. 64. - No. 3. - P. - 376-389.  
 4. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. - М.: Недра, 1987. - 221 с.

Получено: 29.11.06.

УДК 661.854...22:666.3.032.4

**Г.Д. Бицоев, Г.М. Мутанов**  
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛИТЕЙНЫЕ СВОЙСТВА  
ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ШЛИКЕРА**

Воздействие ультразвуковых колебаний (УЗК) на дисперсные системы из оксида бериллия сопровождается изменением их структуры и, как следствие, приводит к изменению реологических свойств. Исследования проводили на ультразвуковом ротационном вискозиметре РВ-УЗ и на конусном пластомере, оснащенном специальной ультразвуковой кюветой. В ходе экспериментов изучали влияние УЗ-обработки и ее длительности на изменение вязкости и предельного напряжения сдвига шликеров в зависимости от температуры (55–74 °C), и содержания связки (7,5–11,7 % вес.). Одновременно анализировали изменение этих свойств во времени после ультразвукового воздействия и характер течения в исследуемых системах. Влияние ультразвуковых колебаний на реологию шликеров в пластическом состоянии (интервал температур 42–54 °C) оценивали по изменению пластической прочности.

Обработка термопластичных шликеров из оксида бериллия ультразвуком приводит к существенному изменению их реологических свойств (рис. 1).

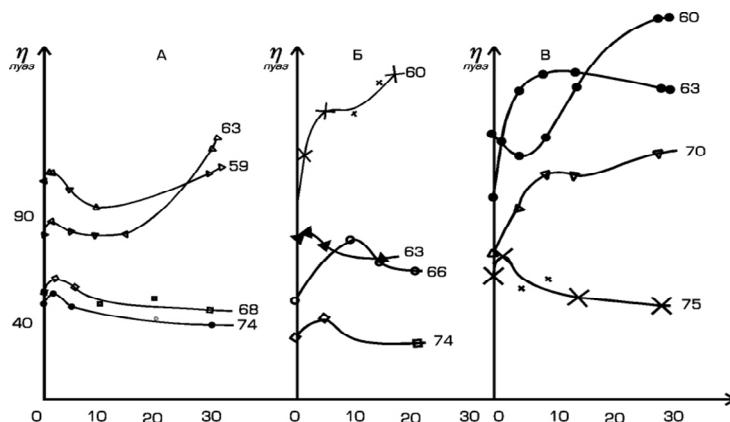


Рис. 1. Зависимость вязкости шликеров ( $\eta$ ) от длительности УЗ-обработки ( $\tau$ ) при различных температурах (содержание связки А – 11,7%; Б – 10,7%; В – 10,0%)

Для шликеров с разным содержанием связки независимо от их температуры с ростом длительности ультразвуковой обработки отмечается немонотонное изменение вязкости.

Так как объяснение немонотонного изменения вязкости отсутствует или по этому вопросу высказаны самые общие соображения, представляется необходимым объяснить наблюдаемые изменения этого параметра:

1. Наличие экстремумов в условиях малых длительностей обработки (1 - 5 мин.) связано с образованием «новых» поверхностей вследствие разрушения под воздействием кавитации агрегатов частиц твердой фазы. На дезагрегацию дисперсной фазы указывают, в частности, данные по изменению гранулометрического состава текущих партий порошков BeO, обработанных ультразвуком (табл. 1).

Вновь образующиеся поверхности адсорбируют связку, вызывая тем самым ее перераспределение в объеме дисперсной системы. Это приводит к увеличению доли жидкой фазы, находящейся в кинетически связанным состояниях в сольватных оболочках вокруг частиц твердой фазы, за счет уменьшения количества кинетически свободной связки, во многом ответственной за реологические свойства шликеров.

2. Уменьшение вязкости шликеров (время УЗ-обработки 5 - 15 мин.) связано с интенсивными массообменными процессами на границе раздела фаз с разными характеристиками (твердой дисперсной фазы и дисперсионной среды). Этот массообмен, обусловленный известными закономерностями волновых процессов, протекающих в дисперсных системах, способствует более интенсивной адсорбции олеиновой кислоты и воска на границе раздела фаз, что улучшает смачивание твердой фазы. Следствием последнего является уменьшение толщины сольватных оболочек, приводящее к увеличению доли кинетически свободной связки и соответственно к снижению вязкости и предельного напряжения сдвига.

Таблица 1. Параметры гранулометрического состава серийных порошков оксида бериллия

Сорт порошка	Номер партии	Гранулометрические параметры					
		Необработанные ультразвуком порошки			Обработанные ультразвуком порошки		
		среднее арифмет., мкм	Медиана, мкм	% частиц < 1,5 мкм	среднее арифмет., мкм	Медиана, мкм	% частиц < 1,5 мкм
H-4	П32/1	10,39	8,4	11,6	5,6	3,5	28,4
H-4	П32/2	8,16	5,9	15,5	7,38	4,6	23,2
H-4	П33/4	6,4	4,7	14,7	2,6	1,2	58,7
H-4	П33/6	8,32	6,2	15,6	4,95	2,7	34,0
H-4	П41/1	16,2	14,0	2,7	1,3	0,8	73,1
H-4	П41/2	16,9	17,5	9,8	1,8	0,9	60,0
B-2	П23/1	11,13	10,7	27,6	2,56	1,4	52,0
B-2	П23/2	10,45	9,6	27,3	1,35	0,9	66,3

3. Возрастание вязкости при более продолжительном воздействии (15÷30 мин.) на литьевые системы ультразвуком, особенно для наиболее «холодных» шликеров (менее 60 °C), связано с диспергацией кристаллитов предельных углеводородов, слагающих парaffин, что вызывает снижение доли в объеме граничных слоев олеиновой кислоты и компонентов воска за счет их миграции к диспергированным кристаллитам углеводородов с

более высокой молекулярной массой. Результатом последнего является уменьшение толщины прослоек расплава, выполняющего роль смазки и находящегося в кинетически свободном состоянии.

Таким образом, характеристики течения литьевых систем, обработанных ультразвуком, изменяются в зависимости от длительности ультразвукового воздействия, температуры шликара, содержания связки.

Отличительной способностью релаксации реологических свойств шликеров после ультразвуковой обработки является существенное различие в протекании этого процесса в зависимости от температуры литьевой системы. Так, если в шликеере при температуре выше 60 °C изменение вязкости во времени после УЗ-воздействия протекает еще в процессе обработки, т.е. система уже находится в равновесии, то в «холодном» шликеере (менее 60 °C) релаксационные процессы, сопровождающиеся увеличением вязкости, продолжаются в течение всего времени определения (90 мин.) (табл. 2). Однако как в том, так и в другом случаях характер течения шликара не изменяется.

Таблица 2. Изменение вязкости шликара (10,7 % связки) в процессе хранения после 30 мин. УЗ-обработки

Температура	Время выдержки, мин.							
	0	15	25	30	50	65	70	> 70
60	141	188	-	-	227	-	-	235
63	124	-	-	110	-	105	-	113
66	46	-	44	-	-	-	46	48

Для шликеров с разным содержанием связки характер изменения пластической прочности от времени воздействия ультразвука одинаков (рис. 2). Резкое уменьшение пластической прочности наблюдается после включения ультразвука. В течение всего времени воздействия ультразвуковых колебаний пластическая прочность плавно незначительно увеличивается, а после прекращения УЗ-воздействия на массу через определенное время восстанавливается до значения близкого к первоначальному.

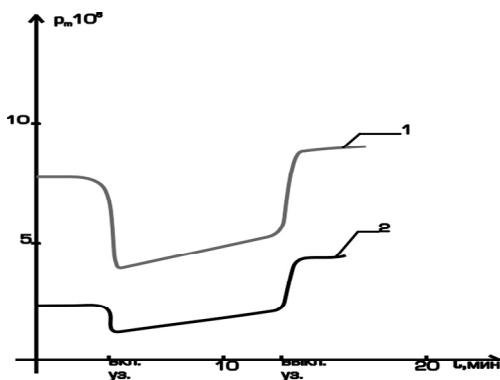


Рис. 2. Изменение пластической прочности шликара во времени после включения и отключения ультразвуковых колебаний: 1 - кол. связки 10 %; 2 - кол. связки 11,7 %

Таким образом, в диапазонах температур как выше (55 - 74 °C), так и ниже (42 - 55 °C)

температуры отвердевания варьирование интенсивностью и температурно-временными параметрами УЗ-обработки позволяет в технологическом интервале содержания связки (9,5 - 11,7 %) достаточно эффективно воздействовать на реологию дисперсных систем: оксид берилия - термопластичная связка. Механизм такого воздействия связан с управлением сорбционными слоями (соотношение свободной и связанной связки) и состоянием поверхности раздела твердой и жидкой фаз. При этом наиболее благоприятные условия для формования методом литья с точки зрения деформационного поведения литейных систем (тиксотропное течение, низкая вязкость и др.) достигаются в области интервалов температур 63-68 °С и времени УЗ-воздействия 7 - 10 мин.

Получено: 12.12.06.

УДК 661.854...22:666.3.032.4

**Г.М. Мутанов, Г.Д. Бицоев**

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**Г.П. Акишин, М.К. Альжанов, С.К. Кайгородов, В.Я. Сапунцов, С.К. Турнаев**

ТОО «Альтрейд», г. Усть-Каменогорск

#### ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ТЕХНОЛОГИЮ ЛИТЬЯ И СВОЙСТВА ОТЛИВОК

Технологический цикл формования керамической детали методом длинномерного литья термопластичных шликеров включает стадии заполнения формообразующей полости и отвердевания шликера. Наилучшие условия формирования отливки – заполнение под давлением с наименьшим захватом газов из полости формы с последующим уплотнением при направленном затвердевании отливки – определяются, прежде всего, правильным выбором технологических параметров.

В этой связи при изучении процесса активации литья термопластичных шликеров ультразвуком основным направлением исследований явилось установление взаимосвязи параметров процесса литья и свойств отливок от условий ультразвукового воздействия. Исследования проводили применительно к шликерам из оксида берилия с различным содержанием связки (9,5 и 11,2 %) на установке непрерывного литья. В качестве экспериментального образца была принята шестигранная трубка.

Для шликеров с разным содержанием связки общей тенденцией, отражающей влияние ультразвука на процесс литья, является уменьшение требуемого литьевого давления с ростом мощности (интенсивности) ультразвуковой обработки (рис. 1). В исследуемой области такая зависимость удовлетворительно описывается линейным корреляционным уравнением вида:  $P = a - bN$  и обусловлена вторичными эффектами, сопровождающими распространение ультразвуковых волн в жидких средах, в частности изменением реологических свойств (вязкости, предельного напряжения сдвига) шликера и снижением трения шликера о стенки фильтры.

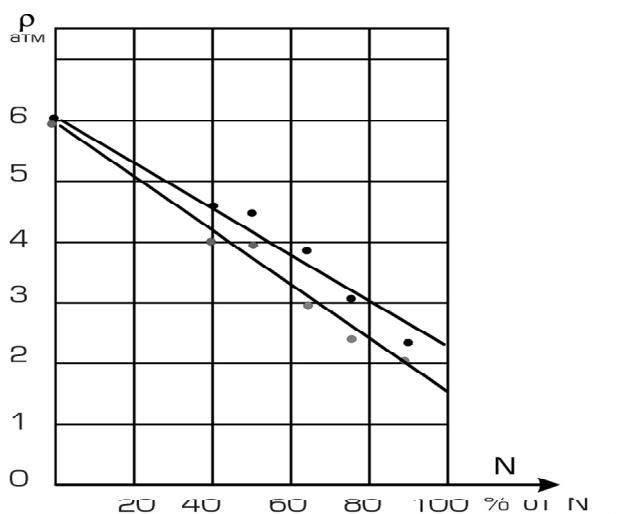


Рис. 1. Зависимость давления литья от мощности ультразвука: 1 - шликер с 11,2 % связки; 2 - шликер с 9,5 % связки

Наряду с облегчением процесса литья, не менее существенное влияние ультразвук оказывает на свойства отливок. Ультразвуковая обработка позволяет получать отливки с более высокой кажущейся плотностью (рис. 2) по сравнению с контрольными образцами, отлитыми без ультразвука. Эта тенденция сохраняется на отливках, прошедших предварительный обжиг (рис. 3).

Вне зависимости от содержания связки в шликере наблюдается устойчивая взаимосвязь между свойствами отливок и мощностью ультразвукового воздействия. Зависимости кажущейся плотности заготовок от мощности ультразвука имеют экстремальный характер и описываются гиперболическим уравнением вида:

$$\rho = \frac{N}{a + bN}.$$

Как видно из рисунков, отливки с максимальной плотностью получаются при мощности ультразвука 60 - 80 % от  $N_{max}$ , что соответствует интенсивности ультразвукового воздействия 0,4 - 1,6 вт/см<sup>2</sup>. Уменьшение плотности отливок при уровне мощности выше 60 - 80 % от  $N_{max}$  в данном случае связано, вероятно, с образованием пористости в отливках в процессе формирования их структуры.

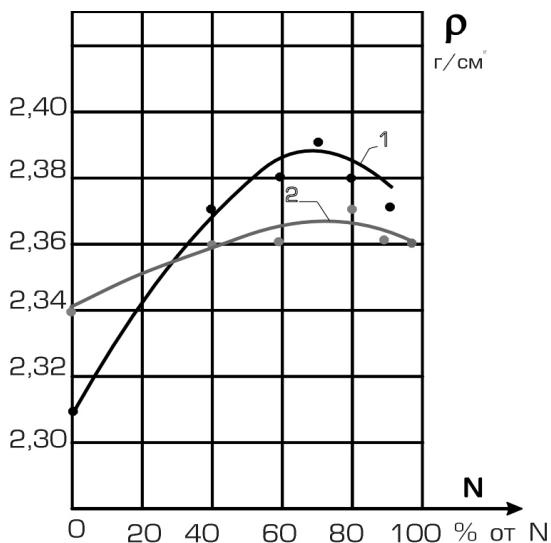


Рис. 2. Зависимость кажущейся плотности отливок от мощности ультразвука

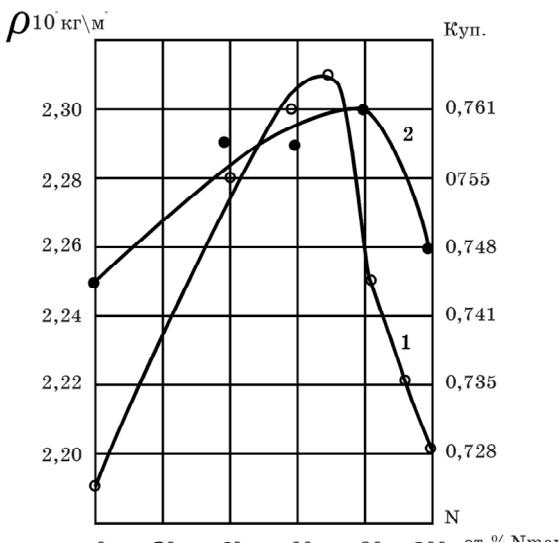


Рис. 3. Зависимость кажущейся плотности образцов после предварительного обжига и коэффициента упаковки от мощности ультразвука:  
1 - шликер с 11,2 % связки; 2 – шликер с 9,5 % связки

Исходя из представлений о динамике образования и развития единичной кавитационной полости и кавитационной области в звуковом поле, представляется возможным объяснить механизм образования пористости следующим образом. С возрастанием мощности ультразвука увеличиваются как размеры кавитационной области, так и общее количество вновь образующихся кавитационных полостей. При этом, поскольку обработка шликера ультразвуком при литье проводится в потоке, начиная с определенной интенсивности УЗ-обработки, часть кавитационной области попадает в зону охлаждения фильтры. В этой зоне, вследствие изменившихся теплофизических условий и удаления от источника излучения, происходит изменение реологических свойств шликера, ослабление статического и звукового давлений. Поэтому часть кавитационных пузырьков в этих условиях не достигает на стадии сжатия критического давления (т.е. не взрывается) и по мере нахождения в зоне охлаждения формообразующей полости фильтры оказывается при структурообразовании отливки зафиксированными в ее теле.

Характерным для процесса литья с ультразвуком является возможность формирования полуфабриката с более высокой плотностью из шликеров с разным соотношением твердой и жидкой фаз (Т:Ж).

Увеличение плотности отливки, а соответственно и плотности упаковки, свидетельствует об изменении под воздействием ультразвука объемно-фазовых соотношений при структурообразовании отливки. Учитывая незначительность содержания газовой фазы в жидком шликере и равные условия охлаждения отливки во всех экспериментах, увеличение плотности отливок, сформированных с ультразвуком, обусловлено, по-видимому, более эффективной компенсацией усадки при отвердевании отливки. При этом компенсация усадки при литье с ультразвуком достигается как с помощью классического ме-

низма компенсации усадки за счет подпитки отливки жидким шликером, так и за счет деформационного уплотнения шликера при структурообразовании отливки.

Рассматривая зависимости представленные на рис. 2-3, особо следует отметить лучшую компенсацию усадки (в 1,5 – 2 раза) у образцов, сформованных из шликера с большим (11,2 %) содержанием связки, что, по-видимому, обусловлено оптимальным сочетанием использованных режимов УЗ-обработки и состава шликера (Т:Ж). Данный факт позволяет рекомендовать для литья заготовок из термопластичных шликеров на основе ВеO, при использовании ультразвукового воздействия, применение наиболее технологичных, с точки зрения массоподготовки и литья, шликеров с большим (11,0-11,7 %) содержанием связки. Это является несомненным достоинством процесса литья с ультразвуком, учитывая технологические трудности приготовления и переработки высокотеплопроводных шликеров с минимальным (9,5-10,5 %) содержанием связки в производственных технологических процессах.

Получено: 14.12.06.

---

УДК 553.411 (574)

**М.С. Рафаилович, С.С. Айтбаева**

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**А.В. Смирнов, О.А. Федоренко, В.К. Краснобородкин, Г.В. Подковырин**

НИИ природных ресурсов ЮГГЕО, г. Алматы

#### ГЕОЛОГИЯ, ГЕОДИНАМИКА И МИНЕРАГЕНИЯ ЗОЛОТА КАЗАХСТАНА

Золото – стратегический вид полезных ископаемых Казахстана [2]. Для оценки качества минерально-сырьевой базы, количественного обоснования потенциала недр, научно-технологического обеспечения поисковых работ в настоящее время необходима новая, нетрадиционная систематика месторождений, учитывающая современную конъюнктуру золота, с одной стороны, и лучшие достижения в области геодинамического и формационного анализов, с другой. В статье рассматривается вариант подобной систематики. Ключевым звеном в ней является емкое понятие минерагенического комплекса. Минерагенический комплекс (МК) – это устойчивый парагенезис одного или нескольких геологопромышленных типов (ГПТ) месторождений со специфическим набором рудоконтролирующих и рудовмещающих магматических, осадочных, вулканических и метаморфических формаций, «привязанный» к определенным хронологическим рубежам, геодинамическим режимам и литолого-стратиграфическим горизонтам земной коры. По своему определению термин МК близок таким понятиям, как металлогеническая формация, петро-металлогеническая формация, металлогеническая ассоциация, гибридная формация, металлогенический комплекс, разработанным и апробированным в разные годы ведущими специалистами СНГ и Казахстана (В.И. Смирнов, Д.В. Рундквист, В.А. Кузнецов, Л.А.

Мирошниченко, Е.В. Пучков и др.). При обосновании золотообразующих МК использовался авторский опыт минерагенических и геодинамических исследований в горнорудных районах республики.

Структуру МК определяют геохронология, геодинамика и вещественный состав основных его компонентов – взаимосвязанных ГПТ, магматических и геологических формаций. Предлагаемая систематика впервые максимально полно освещает весь спектр ГПТ руд золота, их геодинамическую природу и распределение во времени, вхождение в тот или иной МК, индикаторные соотношения с вмещающей средой, коммерческую значимость (табл.).

Золотой потенциал Казахстана подразделяется на четыре приоритетных уровня. Первый, самый важный уровень (около 70 % золота) образуют наиболее изученные и разрабатываемые ГПТ, включающие крупные и очень крупные месторождения (в скобках – эталонные объекты): золото-сульфидно-кварцевый жильный (Акбакай, Бестюбе), золото-сульфидно-кварцевый штокверковый (Васильковское), золото-сульфидный прожилково-вкрашенный (Бакырчик) и золото-колчеданно-полиметаллический (Риддер-Сокольное). Соотношение ресурсов золота по ГПТ, с учетом отработанных запасов, близко к 1:1:1:1. Промышленное значение месторождений золота данного уровня сохранится и в будущем. Второй уровень (~ 15 %, возможно более) слагают слабо освоенные районы и месторождения эпiterмального класса в вулкано-плутонических поясах (ВПП) и золотоносные коры выветривания (Сузdalское, Комаровское, Мукур и др.). Этот уровень, по нашим оценкам, в перспективе может изменить структуру прироста запасов золота в сторону его увеличения. Третий по промышленной значимости уровень представлен двумя комплексными типами (суммарно 10 %, соотношение 1:1): золото-медно-порфировым (Нурказган, Коктасжал) и золото-медно-колчеданным (Мизек, Варварынское, Акбастау). Роль этих типов существенно выросла в последние годы в результате их целеустремленной переоценки на золото (Нурказган, Варварынское, Мизек). Четвертый резко подчиненный уровень включает золото-скарновые (2 %) и россыпные (1-1,5 %) месторождения.

Золотой потенциал рассредоточен по 11 минерагеническим этапам (R-V, O<sub>1-2</sub>, O<sub>3</sub>, D<sub>1-2</sub>, D<sub>2-3</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, P<sub>1</sub>, P<sub>2-T<sub>1</sub></sub>, K<sub>2</sub> и P-Q) и 25 специальным золотоносным МК (табл.). На золото максимально продуктивны четыре возрастных рубежа: O<sub>3</sub> и D<sub>1-2</sub> (55-60 % золотого потенциала, главные ГПТ – акбакайский и степнякский золото-сульфидно-кварцевый жильный, васильковский золото-сульфидно-кварцевый штокверковый, рудно-алтайский золото-колчеданно-полиметаллический и нурказганский золото-медно-порфировый), C<sub>3</sub> (~20 %, бакырчикский золото-сульфидный прожилково-вкрашенный тип) и K<sub>2</sub> (до 10 %, золотоносные коры выветривания, сузальский и другие типы [3]).

ISSN

1561-4212.

ВЕСТНИК

21

ВКГТУ,

2006,

№

4

ГЕОЛОГИЯ, ГОРНОЕ ДЕЛО, МЕТАЛЛУРГИЯ

---



ISSN

1561-4212.

ВЕСТНИК

23

ВКГТУ,

2006,

№

4

ГЕОЛОГИЯ, ГОРНОЕ ДЕЛО, МЕТАЛЛУРГИЯ

---



ISSN

1561-4212.

ВЕСТНИК

25 ВКГТУ,

2006,

№

4

ГЕОЛОГИЯ, ГОРНОЕ ДЕЛО, МЕТАЛЛУРГИЯ

---

Для минерагенического анализа на золото наибольший интерес представляют геодинамические обстановки – островодужная энсиматическая ( $O_{1-2}$ ,  $O_3$ ,  $D_{1-2}$ ), островодужная энсиалическая ( $O_3$ ,  $D_{1-2}$ ,  $C_2$ ), вулкано-плутонических поясов ( $D$ ,  $Pz_3$ ), коллизионная ( $O_3$ ,  $C_{2-3}$ ,  $P_1$ ) и внутриконтинентальная ( $Mz-Kz$ ). Важное значение в формировании золотого ресурса имел рифей-вендский континентальный рифтогенез с минерализованными углеродисто-терригенно-карбонатно-кремнистыми осадками (базовая формация для крупнотоннажных штокверков и минерализованных зон).

Золотое оруденение по тектоническим (геодинамическим) структурам распределяется следующим образом: структуры коллизионно-аккреционного происхождения ~ 36 % (васильковский, бакырчикский, акжалский и другие типы); Степнякская, Рудно-Алтайская и другие энсиалические островные дуги - 23 % (степнякский, кварцитовогорский, рудноалтайский, варваринский типы); Девонский Центрально-Казахстанский и Позднепалеозойский Прибалхашско-Илийский ВПП - 20 % (акбакайский, таскоринский, нурказганский, абызский и другие ГПТ); Западно-Мугоджарская, Майкаинская, Абралинская энсиматические островные дуги - 7 % (юбилейный, майкаинский, мизекский типы), внутриконтинентальные коры выветривания - до 5-10 % (сузdalский, комаровский типы), внутриконтинентальные рифты с R-V осадками - 2 % (каратаяуский, кокшетауский типы), современные аллювиально-пролювиальные долины - менее 2 % (россыпи Au).

Основная масса коммерческого золота (более 85 %) концентрировалась в обстановках коллизии и активных континентальных окраин (островные дуги, ВПП), находясь в теснейшей парагенетической связи со специализированными магматическими комплексами и метасоматическими формациями. С гипабиссальными и гипабиссально-мезоабисальными островодужными и коллизионными комплексами малых интрузий габбродиорит-гранодиорит-плагиогранитового ряда (степнякский  $O_3$ , карамендинский  $D_1$ , кызылжартасский  $D_{1-2}$ , кунушский  $C_3$ , саякский  $P_1$  и др.) сопряжены многие крупные и средние золотые и золотосодержащие месторождения (Жолымбет, Акбакай, Бакырчик, Нурказган, Саяк IV и др.). С коллизионными позднеордовикскими батолитами диорит-гранодиорит-гранитов зерендинского и курдай-шатыркольского комплексов тесно ассоциируют мезотермальные крупнообъемные золотоносные штокверки (Васильковское, Когадыр). Характерными спутниками малоглубинных золотых, золото-серебряных, золото-медно-колчеданных и золото-медно-колчеданно-полиметаллических месторождений (Таскора, Архарлы, Риддер-Сокольное, Акбастау и др.) являются вулканические аппараты, субвулканические тела и дайки переменного состава («порфиры» Рудного Алтая, диоритовые порфириты керегетасского комплекса, плахиогранит-гранодиориты космурунского комплекса и др.). Индикаторные метасоматические формации мезотермальных месторождений золота – калишпатитовая, скарновая, углеродисто-серицитолитовая, березитовая и лиственитовая, эпiterмальных – кварц-турмалиновая, кварц-адуляровая, аргиллизитовая, вторичнокварцитовая.

Рудовмещающие формации – обязательный компонент и «чуткий» индикатор геоди-

намической природы МК, нередко источник металла, катализатор рудных процессов и структурообразующий фактор. Древние (R-V) рифтогенные терригенные, карбонатные, углеродисто-терригенно-кремнистые минерализованные осадки (алексеевская, бакырлинская, куюкская и другие свиты) явились благоприятной средой и источником золота для формирования вкрашенных, жильных и жильно-прожилковых руд золота. Океанические толеитовые базальты (мугоджарская свита, D<sub>1-2</sub>) вмещают крупнообъемный штокверк Юбилейного месторождения. Дифференцированные терригенные, вулканогенно-терригенные и вулканогенные толщи островных дуг и ВПП (свиты жериккудукская O<sub>1-2</sub>, байдидаулетовская O<sub>2-3</sub>, айгыржальская и шешенкаринская D<sub>1</sub>, лениногорская D<sub>1-2</sub>, керегетасская C<sub>2</sub>, жельдыкаринская P<sub>2</sub> и др.) сопровождают необычайно широкий спектр месторождений (золото-сульфидно-кварцевые, золото-сульфидные, золото-серебро-адуляр-кварцевые, золото-медно-колчеданные, золото-колчеданно-полиметаллические, золото-медно-порфировые). Широким диапазоном функций, благоприятных для рудообразования (ресурсная, барьерная, транзитная, структурообразующая), обладают разновозрастные углеродисто-терригенные, углеродисто-терригенно-карбонатные, углеродисто-терригенно-кремнистые осадки (свиты шарыкская R<sub>3-V</sub>, дуланкаринская O<sub>3</sub>, аркалыкская C<sub>1</sub>, буконьская C<sub>2</sub> и др.), подверженные интенсивным тектоническим деформациям. С региональными зонами смятия «черносланцевого типа» в Казахстане и соседних регионах тесно связаны очень крупные золоторудные поля (Васильковское, Бакырчикское, Мурунтауское, Кумторское и др.) [1, 4, 5].

Основное назначение новой систематики золоторудных месторождений – оперативная, целенаправленная и более надежная, чем это было ранее, оценка перспективных регионов на привычные и нетрадиционные ГПТ, принятие оптимальных решений в поисковой и оценочной геологии золота. Для большей практической направленности геодинамическая и формационная систематика может быть усиlena прогнозно-поисковыми характеристиками эталонных рудных районов и месторождений (геолого-структурная позиция, геофизические поля, метасоматические и метаморфические фации пород, золотопродуктивные минеральные ассоциации, типоморфизм самородного золота и сопутствующих минералов, геохимические параметры и т.д.). Новая систематика применима при работах на золото не только в Казахстане, но и в других районах Азии, а ее содержание и принципы составления могут быть распространены и на другие металлы.

#### Список литературы

1. Атлас литолого-палеогеографических, структурных, палинспастических и геоэкологических карт Центральной Евразии. – Алматы, 2002. – 70 с.
2. Рафаилович М.С., Нурипов Е., Ракишев Б.М. Золото недр Казахстана: настоящее и будущее (некоторые геологические аспекты) // Геология и разведка недр Казахстана. – 1998. – №1. – С. 2-9.
3. Рафаилович М.С., Федоренко О.А., Брызгалов С.Л. Золотоносные коры выветривания Казахстана: геолого-генетическая систематика, нетрадиционные типы сырья, приоритетные рудные районы // Современные проблемы металлогении. – Ташкент, 2002. – С. 80-82.
4. Ужкенов Б.С., Мазуров А.К., Смирнов А.В. и др. Строение, формирование и рудоносность главных сутурных зон Центральной Евразии // Проблемы рудных месторождений и повышение эффективности геологоразведочных работ. – Ташкент, 2003. – С. 37-39.
5. Федоренко О.А., Быкадоров В.А., Мазуров А.К. и др. Основные черты металлогении Центральной Евразии в свете палеогеографических и геодинамических реконструкций // Тектоника и металлогенез Центральной и Северо-Восточной Азии. – Новосибирск, 2002. – С. 147-148.

Получено: 24.10.06.

