



УДК 550.42

**О.Д. Гавриленко, Н.А. Зимановская**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск

#### ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИТИЯ В НАРЫМЕ

В последнее время в связи с развитием альтернативной энергетики возрастает внимание к минеральным ресурсам, обеспечивающим сырьем данную отрасль. Одним из таких компонентов является литий как исходное сырье для развития технологий по хранению энергии. Поэтому весьма актуальным представляется изучение его геохимических особенностей в пределах территории с проявлением редкометалльного оруденения. Длительное время главное промышленное значение имели месторождения гранитных пегматитов натро-литиевого типа (как источник лития). И лишь в последние десятилетия на первый план вышли месторождения, связанные с рапой соляных озер. Сегодня это основной источник добычи лития. Примерно 60 % ресурсов находится в рассолах соляных озер, около 26 % - связаны с литиевыми пегматитами, а остальная часть литиевых ресурсов сосредоточена в осадочных породах, рассолах геотермальных и нефтяных полей [1]. Сегодня многие исследователи продолжают поиски перспективных месторождений лития. Особенно успешными оказались геологоразведочные работы, проведенные в Китае, что позволило составить конкуренцию добыче лития из рассолов в Южной Америке. Также высокие промышленные концентрации лития устанавливаются в содовых щелочных озерах из районов молодого континентального вулканизма Боливии, США и Китая. В будущем весьма перспективным источником лития могут стать геотермальные воды.

В ближайшее время целесообразно сосредоточить исследования на территориях, где в ходе различных геологических процессов могли сконцентрироваться литиевые соединения. К таковым относится и Восточный Казахстан, в пределах которого известен ряд металлогенических зон, имеющих редкометалльный профиль [2, 3]. В течение длительного времени здесь разрабатывались месторождения литиевых пегматитов. Как правило, проявление минерализации редких лиофильных элементов обусловлено эндогенными процессами и последующим перераспределением их в ходе других геологических процессов, что фиксируется в соответствующей геохимической специфике. Поэтому весьма важным является выявление площадей, характеризующихся геохимической спецификой на литий. Именно в пределах таких территорий возможно выявление как традиционных типов литиевых проявлений, так и новых.

С этой целью на территории Восточно-Казахстанской области, в том числе и в районах с проявлением редкометалльной минерализации, проводились региональные геохимические исследования. К таковым территория относится и Нарым (рис. 1).

В геоисторическом аспекте формирование данного блока земной коры происходило в позднюю (постколлизионную) стадию ( $C_3-T_1$ ) в геодинамической обстановке внутриплитной активизации. В ходе этих процессов сформировались постколлизионные гранитоидные пояса с редкометалльным и редкометалльно-редкоземельным оруденением, раз-

местившиеся на границах Калба-Нарым-Бурчумского и Иртыш-Фуюньского литосферных блоков. Установлена закономерная пространственная приуроченность редкometалльных поясов к тектонически ослабленным зонам в континентальных блоках земной коры повышенной сиаличности. Наиболее крупный и хорошо проявленный Калба-Нарымский пояс сопровождался промышленными пегматитовыми, апогранитовыми, грейзеновыми и грейзено-кварцевожильными месторождениями (Ta, Nb, Be, Li, Cs, Sn, W и др.), генетически связанными с гранитами калбинского комплекса Р<sub>1</sub>. В Нарыме в данном поясе наиболее крупными гранитными массивами являются Прииртышский, Бурабайский, Калгутинский.



Рисунок 1 - Обзорная карта района работ

В течение киммерийского цикла данная территория представляла собой пенепленизированную плиту с формированием кор выветривания каолинового профиля. В альпийскую стадию территория Нарыма была подвержена континентальной коллизии и орогененза. В ходе этих процессов восточная часть Нарыма была приподнята, что привело к частичному разрушению кор выветривания и переотложению их в Зайсанской впадине.

Весь ход геологической истории привел к формированию на территории Нарыма значительного количества грейзеновых и грейзено-кварцевожильных олово-вольфрамовых месторождений. Также здесь известны месторождения редкometалльных пегматитов и апогранитов и россыпные месторождения устойчивых редкometалльных минералов. Наличие в Нарыме большого количества рудных месторождений и их пространственная сближенность позволила в пределах Калба-Нарым-Бурчумского литосферного блока выделить Нарымский рудный район с наболее крупными рудными узлами: Ленинско-Чердоякский, Касаткинско-Буландинский, Бурабай, Торткалмак, Карасу (рис. 2). Редкometалльный лиофильный профиль данных месторождений позволяет предположить и наличие определенных перспектив на выявление литиевых объектов на данной территории.

С этой целью в пределах Нарымского рудного района были проведены работы по региональному геохимическому картированию по рыхлым отложениям в масштабе 1:500 000 с отбором лиохимических проб по вторичным ореолам. Особое внимание при этом уделялось изучению геохимии лития. В ходе полевых исследований опробовались почвы из закопуш на глубину до 20 сантиметров по ориентировочной сети 5x5 километров. Отбор проб почв и грунтов проводился в соответствии с ГОСТ 28168. Привязка то-

чек опробования осуществлялась с помощью GPS-навигатора GARMIN. В итоге было отобрано 163 почвенных пробы на обследованной территории площадью свыше тысячи квадратных километров.

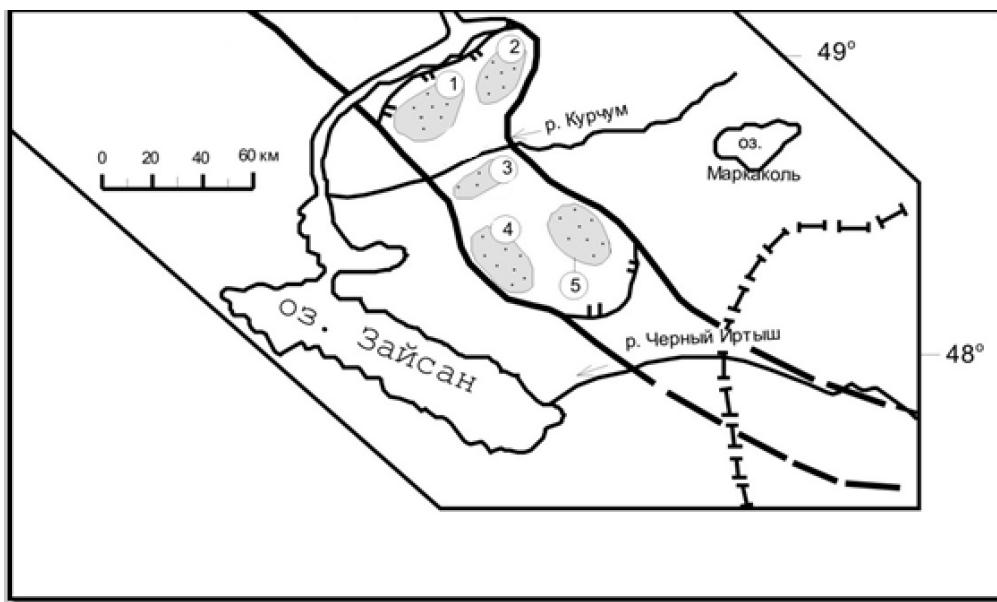


Рисунок 2 - Районирование Нарымского рудного района рудные узлы: 1 - Ленинско-Чердоякский,  
2 - Касаткино-Буландинский, 3 - Бурабай, 4 - Торткалмак, 5 - Карасу

Отобранные геохимические пробы были направлены в лабораторию инженерного профиля «ИРГЕТАС» для проведения аналитических исследований методами ИСП-МС спектрометрии на 70 элементов. Масс-спектрометрический метод определения элементов основан на измерении интенсивности потока ионов определяемых элементов с определенным отношением массы к заряду, возникающему при распылении пробы в аргоновую плазму, индуктивно возбуждаемую радиочастотным электромагнитным излучением.

Проведенные исследования показали, что содержание лития в почвах в пределах Нарыма колеблется от 8,5 до 270 г/т и характеризуется логнормальным законом распределения (рис. 3). Среднее фоновое содержание составляет 28,6 г/т, аномальные значения определяются выше 58 г/т.

На основании расчета парных коэффициентов корреляции были выявлены естественные геохимические ассоциации лития. Наиболее близкими по отношению к литию оказались цезий, олово и медь. Крайним антагонистом выступил кремний.

По результатам регионального геохимического картирования в пределах Нарыма было выявлено четыре крупных площадных аномалии лития: Чердоякская, Бурабайская, Калгутинская и Карасуская (рис. 4). Все они приурочены к выходам гранитных интрузий калбинского комплекса или их приконтактовых зон и сопровождают различные типы редкometальных месторождений, объединенных в соответствующие рудные узлы.

Используя разработанную авторами методику оценки геохимических аномалий [4, 5], выявленных в ходе регионального картирования на основе естественных ассоциаций химических элементов, была оценена их перспективность и рекомендована постановка первоочередных и второстепенных детализационных работ. Основными критериями при

в этом служили коэффициенты геохимической зональности ( $K_3$ ) и интенсивности ( $K_{ii}$ ). На основании их значений наиболее перспективной на предмет выявления литиевой минерализации является Карасуйская аномалия, на втором месте - Чердоякская, на третьем - Бурбайская. Наименее перспективной представляется Калгутинская аномалия.

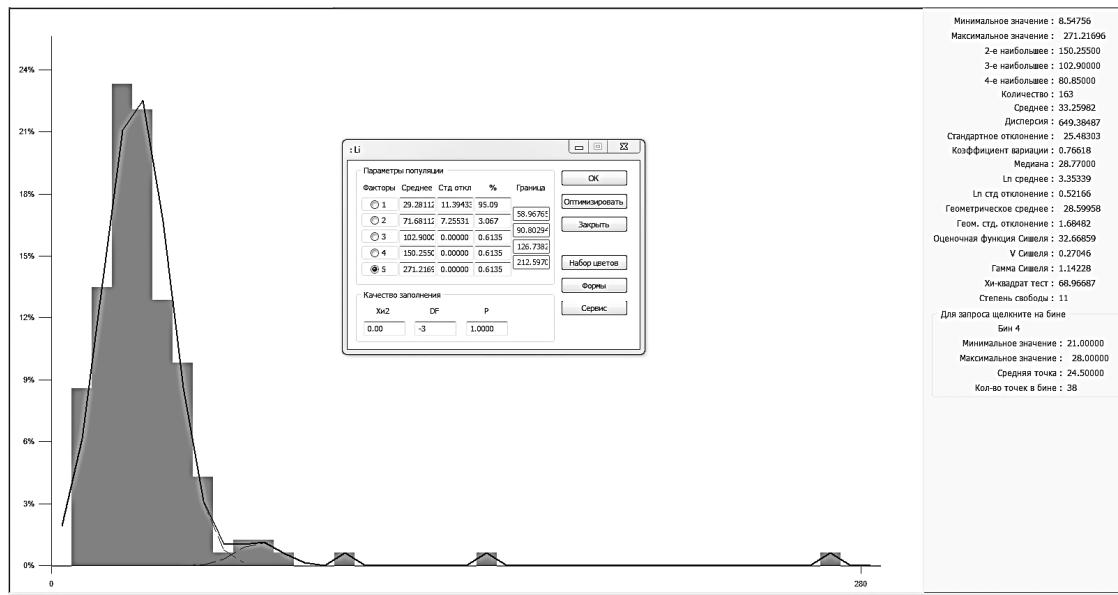


Рисунок 3 - Особенности распределения лития в почвах изученной территории

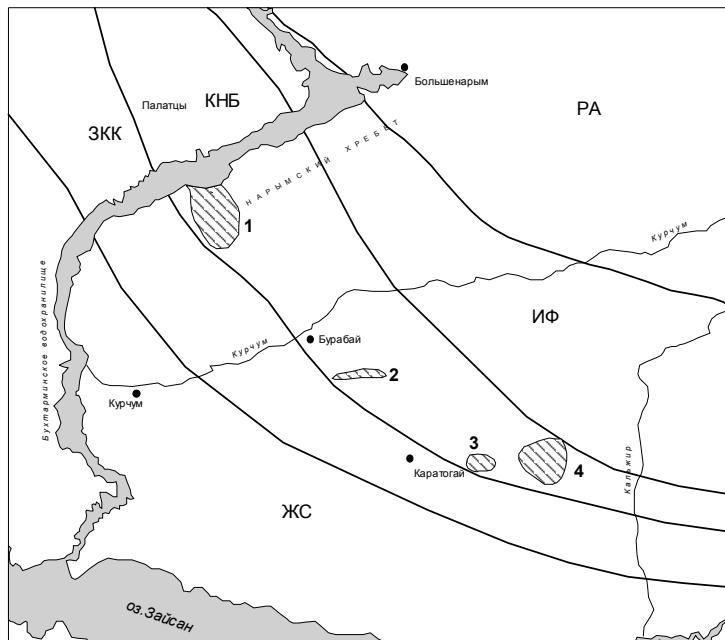


Рисунок 4 - Геохимические аномалии лития в переделах района работ: металлогенические зоны: РА – Рудно-Алтайская, ИФ – Иртыш-Фуюнская, КНБ – Калба-Нарым-Бурчумская, ЗКК – Западно-Калбинско-Коксентауская, ЖС – Жарма-Саурская; геохимические аномалии лития: 1 – Чердоякская; 2 - Бурбайская; 3 - Калгутинская; 4 - Карасуйская

Карасуйская геохимическая аномалия лития локализуется южнее с. Такыркарасу. По коэффициенту продуктивности аномальных элементов (см. табл.) для нее выстраивается следующий ряд естественных ассоциаций химических элементов:  $\text{Cs}_{12,04}\text{Sn}_{11,51}\text{Li}_{5,57}\text{Cu}_{2,29}$ , что больше свидетельствует о ее цезиевом профиле. Коэффициент зональности, определяющий соотношение содержаний надрудных элементов к подрудным  $K_3$ , равен 10,01. Коэффициент масштабности оруденения  $K_i$ , служащий для оценки степени минерализации комплексной аномалии, равен 14,56.

Данная аномалия пространственно совпадает выходами оловоносных кварцевых и грейзеново-кварцевых проявлений. Породообразующие минералы в них представлены кварцем, альбитом, зеленым мусковитом и жильбертитом. Типоморфными минералами также являются флюорит, турмалин, кассiterит, tantalит, стрюверит, халькопирит, пирит, станин, гранат, самарскит, сфалерит (марматит), молибденит. Содержание Sn в выходящих на поверхность кварцевых жилах – более 1 %, в жильном штокверке – 0,01-1,25 %.

#### *Мультипликативные геохимические коэффициенты для аномалий лития*

№ аномалии на карте	Аномалия	K <sub>a</sub>				K <sub>3</sub>	K <sub>i</sub>
		Li	Cu	Sn	Cs		
1	Чердоякская	3,89	0,65	9,2	5,63	6,18	15,68
2	Бурабайская	2,41	0,71	3,62	3,03	3,02	7,55
3	Калгутинская	2,65	0,8	2,61	2,78	2,65	5,26
4	Карасуйская	5,57	2,29	11,51	12,04	10,01	14,56

В районе развития кварцево-жильной оловорудной зоны, локализующейся в сланцевой толще на глубине 500 метров, в результате проведения буровых работ был вскрыт гранитный купол, минерализованный рудоносными (олово, tantal, литий) альбит-гнейзовыми метасоматитами (апогранитами) – месторождение «Карасу». Рудная минерализация приурочена к интрузив-надинтрузивной зоне апикального выступа гранитов. Выделяется четыре структурно-морфологических типа рудных тел: линейные штокверковые зоны, пологие жилы, альбитизированные гранитные апофизы и альбитизированные граниты. Содержание  $\text{Li}_2\text{O}$  в кварцах из кварцевых прожилков апикальных частей скрытых куполов альбит-гнейзовых апогранитов составляет 0,147 % [6]. Содержание в метасоматитах Sn – 0,03-0,5 %,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  – 0,016 % [2]. Таким образом, установленная на поверхности геохимическая аномалия лития с высокими перспективами указывает на наличие на глубине скрытого купола литиеносных апогранитов. Ее цезиевый профиль свидетельствует о самих верхних горизонтах рудной колонны и значительных перспективах выявления на более глубоких горизонтах богатой литиевой и другой редкометалльной минерализации.

Чердоякская аномалия (самая большая по площади) локализуется в пределах северо-западной части Нарымского хребта Прииртышского гранитного массива. Аномалия приурочена к Чердоякскому рудному полю, в пределах которого известен ряд кварцево-гнейзовых месторождений, наиболее крупными из которых являются Чердоякское и Ленинское. Руды данных месторождений в основном состоят из мусковита, полевого шпата, кварца, турмалина и характеризуются развитием таких рудных минералов, как шеелит и кассiterит. Очень часто в них широко развит графит. Из других типоморфных минералов встречены: гранат, пирит, арсенопирит, халькопирит, tantalit-колумбит, флюорит, ковелин, гематит, пирротин, сфен, хризотил-асбест. Содержание основных рудных компонентов колеблется в пределах  $\text{WO}_3$  – 0,038-0,33 %, Sn – 0,018-0,22 % [7].

Проявление на поверхности крупных олово-вольфрамовых месторождений подчеркивается ведущей ролью олова для данной литиевой аномалии, что выражается в геохимической формуле естественных ассоциаций химических элементов:  $\text{Sn}_{9,2}\text{Cs}_{5,63}\text{Li}_{3,89}\text{Cu}_{0,65}$ . Второстепенная роль цезия свидетельствует о более низких горизонтах рудной колонны, выходящих на дневную поверхность. Однако на более глубоких горизонтах возможно обнаружение литиевой минерализации. Подтверждением тому являются и высокие значения коэффициентов зональности и масштабности оруденения в данном районе. Так, коэффициент зональности, определяющий соотношение содержаний надрудных элементов к подрудным  $K_3$ , равен 6,18. Коэффициент масштабности оруденения  $K_{ii}$ , служащий для оценки степени минерализации комплексной аномалии, равен 15,68. Основываясь на данных показателях, можно констатировать, что данная аномалия весьма перспективна на обнаружение новых рудных месторождений, и в частности с литиевой минерализацией. До настоящего времени в пределах Чердоякской литиевой аномалии таковых месторождений выявлено не было.

Второочередными для детального изучения геохимическими аномалиями лития, характеризующимися средними перспективами на выявление новых рудных объектов лития, могут выступать Бурабайская и Калгутинская. В пределах данных аномалий известны небольшие кварцево-грейзеновые и грязеновые оловянные и олово-вольфрамовые месторождения. Причем, исходя из геохимической формулы естественных ассоциаций, Бурабайская аномалия ( $\text{Sn}_{3,62}\text{Cs}_{3,03}\text{Li}_{2041}\text{Cu}_{0,71}$ ) на предмет выявления литиевой минерализации более перспективна, чем Калгутинская ( $\text{Cs}_{2,78}\text{Li}_{2,65}\text{Sn}_{2,61}\text{Cu}_{0,80}$ ). Об этом свидетельствуют и значения геохимических коэффициентов зональности и масштабности оруденения в пределах проявления данных аномалий (см. табл.). Определенный интерес на предмет выявления гидроминеральных литиевых ресурсов могут представлять многочисленные озера, встречающиеся на Бурабайском гранитном массиве в пределах установленной литиевой аномалии. Для проверки данной идеи необходимы дополнительные детализационные геохимические исследования.

Работа выполнена в рамках гранта Комитета науки Министерства образования науки Республики Казахстан по бюджетной программе 055 «Научная и/или научно-техническая деятельность»: подпрограмма 101 «Грантовое финансирование научных исследований», приоритет: «Рациональное использование природных ресурсов, переработка сырья и продукции», подприоритет: «Технологии и методы восполнения минерально-сырьевой базы и водных ресурсов», проект 0104/ГФ4: «Региональное геохимическое картирование территории Нарыма и Южного Алтая с апробацией метода естественных ассоциаций химических элементов».

#### Список литературы

1. Волкова Н.И. Литиевые соляные озера Южной Америки и Центральной Азии / Н.И. Волкова, А.Г. Владимиров, В.П. Исупов и др. // Химия в интересах устойчивого развития. - 2012. - Т. 20. - С. 21-26.
2. Щерба Г.Н. Большой Алтай (геология и металлогения): В 3 кн. /Г.Н. Щерба, Х.А. Беспаев, Б.А. Дьячков и др. - Алматы: Гылым, 1998-2002.
3. Dyachkov B., Zimanovskaya N., Mataibayeva I. Rare metal deposits of EastKazakhstan: geologic position and prognostic criteria // Open Journal of Geology. - 2013. - vol. 3. - P. 404-409.
4. Гавриленко О.Д. Методология оценки перспективности геохимических аномалий // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Сеりкбаева и Вычислительные технологии (Совместный выпуск). - Усть-Каменогорск, 2013. - С. 79-85.
5. Изучение естественных ассоциаций химических элементов в геологических и антропогенных процессах и их влияния на окружающую среду (на примере Рудноалтайского и Калбинского регионов) / О.Д. Гавриленко, С.Я. Мисевра, С.Н. Полежаев и др. // От-

- чет по теме (заключительный). - Усть-Каменогорск, Фонды ГУ «Комитет науки Министерства образования и науки РК», 2014. - 478 с.
6. Степанов А.Е. Новые данные об олово-редкометалльных проявлениях Нарыма / А.Е. Степанов, В.В. Лопатников, Н.И. Мякшин и др. // Геология, геохимия и минералогия месторождений редких элементов. - 1978. - Вып. 5. - Алма-Ата: КазИМС, 1978. - С. 30-38.
  7. Маклецов В.В. Подсчет запасов Чердоякского оловяно-вольфрамового месторождения по состоянию на 1 июля 1956 года. - Усть-Каменогорск, 1956.

Получено 18.12.2015

---

УДК 622.831

**Т.Т. Ипалаков, Б. Апшикур**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск

### **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ НАСЫПНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Известно, что наиболее распространенными моделями для расчетов взаимодействия техногенных сооружений с основаниями являются две взаимоисключающие модели – модель теории предельного равновесия и модель теории упругости. Для реализации указанных моделей существуют в основном два метода решения: инженерные (детерминистические) и численные. При этом инженерные методы используют, когда отвалы сложены полускальными или скальными породами, а второй метод – когда отвалы характеризуются пластическими деформациями. В этом методе наиболее универсальным является метод конечных элементов. При этом также известно, что для получения более достоверных результатов следует использовать решение так называемой смешанной задачи, в которой учитываются как упругие, так и пластические деформации грунтов. Поэтому проблема совершенствования методов расчета взаимодействия отвальных масс с основанием является по-прежнему актуальной. Это особенно важно для отвалов, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях, на неоднородных основаниях, сложенных слабыми грунтами, при неравномерной отсыпке отвала, когда даже характер смещений не может быть определен заранее и, в значительной степени, будет определяться последовательностью его формирования. Ниже рассмотрена реализация указанных методов оценки устойчивости насыпных инженерных сооружений.

*Определение предельных параметров откосов отвалов на слабом основании инженерными методами.* Одной из трудоемких работ по оценке устойчивости отвалов на слабом основании является определение их предельных параметров: высоты отвала, ширины призмы возможного обрушения, длины горизонтальной площадки выпора в основании отвала, максимальной глубины залегания поверхности скольжения в основании отвала. Как правило, указанные параметры отвала устанавливают графоаналитическим способом по общему сопротивлению сдвигу или многоугольником сил [1] при условии предельного равновесия. В работе [2] разработаны аналитические способы решения этих задач, однако они реализуются сложным и громоздким математическим аппаратом. В данной работе предлагается упрощенный способ расчета по круглоцилиндрической поверхности скольжения, позволяющий быстро и с достаточной точностью определять предельные параметры отвала.

Рассмотрим два случая возможного нарушения состояния предельного равновесия от-

вала на слабом основании:

– основание отвала представлено слабыми однородными породами с физико-механическими характеристиками  $\rho_1, k_1, \gamma_1$  для условий  $\rho > \rho_1 \leq 13^\circ$  и  $k > k_1$  ( $\rho, k, \gamma$  – соответственно угол внутреннего трения, сила сцепления и плотность пород отвала);

– в слабом основании имеются горизонтально расположенные контакты слоев горных пород с мощностью  $m$ , силой сцепления  $k'$ , углом внутреннего трения  $\rho'$  и плотностью  $\gamma'$ , при этом  $\rho > \rho_1 \geq \rho'$  и  $k > k_1 \geq k'$ ,  $\rho \leq 13^\circ$ .

Высота отвала определяется по формуле [3]:

$$H = H_{90}^0 / (1 - \sqrt{ctg\alpha \cdot tg\omega_{cp}}), \quad (1)$$

где  $H_{90}^0$  – высота вертикального откоса, вычисленная по средневзвешенным значениям физико-механических свойств пород  $\rho_{cp}, k_{cp}, \gamma_{cp}$  отвала, основания и горизонтального контакта;  $\alpha$  – угол наклона откоса отвала;  $\omega_{cp}$  – угол наклона потенциальной плоской поверхности скольжения.

Высота вертикального откоса:

$$H_{90}^0 = (2k_{cp} / \gamma_{cp}) \cdot tg(45^\circ + 0,5\rho_{cp}); \quad (2)$$

С целью построения наиболее напряженной криволинейной поверхности скольжения (рис. 1) для расчета коэффициента устойчивости отвала находим угол наклона касательной к поверхности скольжения  $\theta'$  [1], т.е. угол излома на границе со слабым слоем:

$$\theta' = 45^\circ + 0,5(\rho - \rho_1) - 0,5 \arcsin(\sin \rho_1 / \sin \rho) \times n_0,$$

где  $n_0$  – коэффициент, учитывающий нормальное напряжение  $\sigma$ , высоту отвала с учетом  $H'$  и без учета  $H$  слабого основания. Ширина призмы возможного обрушения [3]:

$$B = H \cdot (\sqrt{ctg\alpha \cdot tg\omega_{cp}} - ctg\alpha). \quad (3)$$

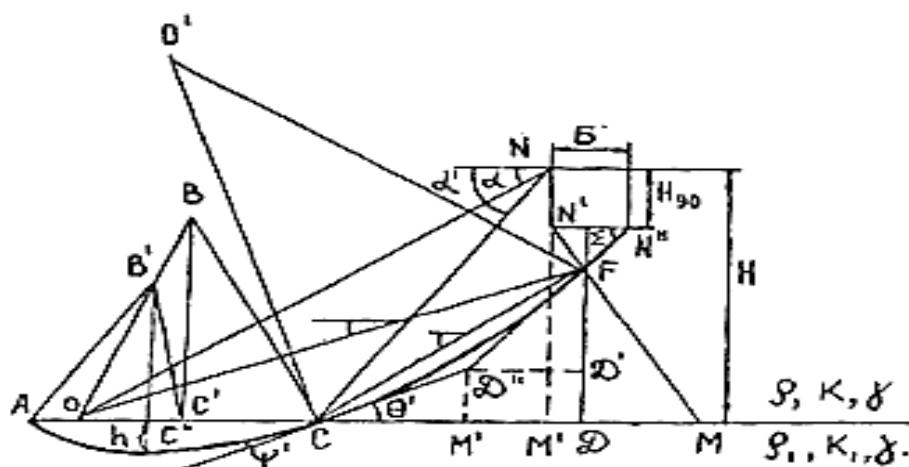


Рисунок 1 – Построение поверхности скольжения откоса отвала на слабом основании

Таким образом, разработанная методика использования средневзвешенных показателей прочностных характеристик, вычисляемых по предлагаемым формулам, позволила предельную высоту отвала со слабым основанием и ширину призмы возможного обру-

шения определить из формул (1) – (3), надежность применения которых проверена на практике. При этом исключаются графоаналитические расчеты и принцип определения предельных параметров отвала подбором на коэффициент запаса, равный единице. Кроме того, параметры  $B, l, h, \alpha, \omega$ , полученные аналитически, дают возможность точнее построить наиболее напряженную поверхность скольжения упрощенным методом, дает одинаковые результаты с наиболее теоретически обоснованным способом В.В. Соколовского. Данная методика расчета является универсальной и позволяет при соответствующих условиях определять устойчивые параметры многоярусных отвалов со слабым и твердым основанием. В связи с отмеченным, нами предлагается данную методику принять как базовую при расчетах устойчивости искусственных насыпных сооружений, сложенных полускальными и скальными породами, инженерными методами.

*Оценка устойчивости насыпных инженерных сооружений методом конечных элементов.* Нелинейность зависимости деформаций от напряжений наиболее достоверным образом может быть учтена с помощью моделей упругопластического деформирования. Привлечение для расчетов напряженно-деформированного состояния сложных математических моделей теории пластического течения для идеальной пластичности, пластичности с упрочнением при ассоциированном и неассоциированном законах течения позволяет учитывать важнейшие особенности поведения грунтов под нагрузкой: нелинейность и необратимость деформаций, свойство изменять объем при сдвиге (эффект дилатансии), зависимость деформаций от пути нагружения и т.д.

Благодаря развитию в последние десятилетия математического аппарата теории численного моделирования, программной реализации и вычислительной техники, в настоящее время расширяется область применения таких численных методов, как метод конечных элементов (МКЭ), который является одним из наиболее эффективных методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) в различных задачах механики деформируемого твердого тела и горных пород, в частности.

Фундаментальный принцип МКЭ заключается в разбиении изучаемой области на элементарные области конечных размеров – конечные элементы (рис. 2). В каждом таком элементе неизвестная функция аппроксимируется полиномом, степень которого меняется в зависимости от поставленной задачи, но остается обычно невысокой (от 1 до 6). Для каждого элемента аппроксимирующий полином определяется его коэффициентами. Коэффициенты могут быть определены значениями функции в частных точках, называемых узлами элемента.

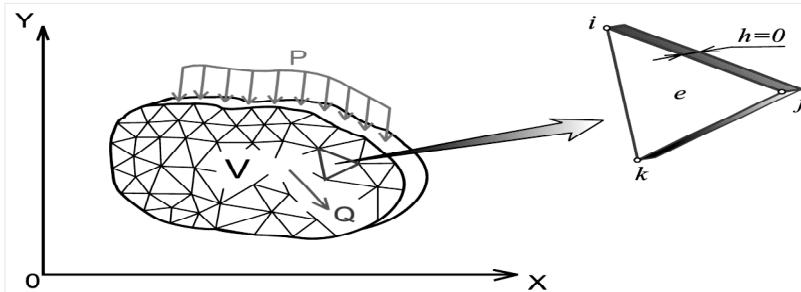


Рисунок 2 – Конечно-элементное представление изучаемой области

Решение статических задач линейной теории упругости (деформируемости) производится на основе численного решения уравнений линейной теории упругости МКЭ [4 - 5].

В настоящее время для моделирования устойчивости естественных и техногенных откосов широко используются разнообразные программные продукты с интегрированными модулями, позволяющими выполнять расчеты методами конечных элементов.

Результатом расчетов является коэффициент уменьшения напряжения или коэффициент безопасности ( $K_{\text{без}}$ ), эквивалентный коэффициенту запаса устойчивости ( $K_s$ ), при котором начинают появляться деформации откоса.

Моделирование по этому методу осуществляется итерационным способом с нахождением на каждом этапе  $K_s$ . На последующем шаге производится снижение прочностных свойств путем увеличения  $K_s$  в соответствии со следующими зависимостями. Расчеты выполняются до тех пор, пока не произойдет деформирование откоса. Данный метод достаточно прост и дает возможность достоверно определять и прослеживать этапы возникновения критических деформаций в откосах.

Одним из факторов, сдерживающих практическое применение методов МКЭ, является необходимость использования в расчетах дополнительных исходных параметров упругости отвальных масс (модель Мора - Кулона) – модуля Юнга (E), коэффициента Пуассона ( $\nu$ ) и угла дилатансии ( $\psi$ ), что характерно для железнодорожных насыпей, сложенных из разнородных грунтов.

*Исследование НДС двухслойной железнодорожной насыпи методом конечных элементов.* Совершенствованию конструкции железнодорожного земляного полотна посвящены труды многих специалистов. Однако методы расчета и устройства двухслойных и многослойных железнодорожных насыпей из разнородных грунтов до последнего времени были изучены недостаточно.

При проектировании земляного полотна в традиционных расчетах нормальных, касательных и главных напряжений условно принимается, что грунты под воздействием временной поездной нагрузки работают в упругой стадии. При этом в расчетах не учитывается разнородность слагающих насыпь грунтов. В математических моделях насыпей они принимаются изотропными.

Внешние нагрузки на земляное полотно и его основание на расчетной схеме традиционно принято представлять в виде совокупности отдельных полосовых нагрузок прямоугольной и треугольной форм, приложенных к полупространству (верху земляного полотна).

Такие расчетные схемы и допущения не соответствуют фактической нагрузке земляного полотна от подвижного состава. Верх земляного полотна фактически воспринимает нагрузку от балластной призмы, воспринимающей давление подошвы шпалы. За торцами шпал верх земляного полотна не нагружен вертикальной поездной нагрузкой. Поэтому в теле земляного полотна можно выделить среднюю нагруженную часть и ненагруженную часть вблизи откосов насыпи (рис. 3) [6], которые имеют различные по величине вертикальные деформации.

В традиционных расчетах земляного полотна не учитывается и конструкция верхнего строения пути (тип рельса, шпалы, размеры балластной призмы) и форма самого земляного полотна (ширина основной площадки, крутизна откосов, наличие берм и др), характеристики которых существенно влияют на распределение поездной нагрузки на верх земляного полотна и в теле земляного полотна. Осадки насыпи и осадки ее основания рассматриваются как одномерные, хотя на самом деле деформации изменяются и по длине пути и по высоте насыпи, то есть являются объемными. Так, при расчетах осадки насыпей и их оснований грунт считается упруго деформируемым. При расчетах же местной и полной устойчивости насыпи считается, что грунт является абсолютно жестким. Классические методы расчета позволяют решать задачи лишь при значительной их идеализации, заменяя реаль-

ное сооружение его расчетной схемой. Внедрение вычислительных систем в инженерную практику позволяет, используя численные методы, производить расчеты практически любого сложного сооружения, разбивая его на конечные элементы.



Рисунок 3 – Напряжения в упругом полупространстве от прямоугольной и треугольной полосовых нагрузок

Во многих технических расчетах упругие свойства вещества характеризуются модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ , полностью описывают упругие свойства изотропного вещества с линейной упругостью, именно они используются при конечно-элементных расчетах технических конструкций. Для задач с нелинейными характеристиками упругости величины  $E$  и  $\mu$  могут вводиться в качестве функций, зависящих от локальных значений тензора деформаций  $\varepsilon_{jk}$ . Модуль упругости Юнга  $E$  имеет размерность давления, а коэффициент Пуассона  $\mu$  является безразмерной величиной. Деформированное состояние твердого тела описывается уравнением, связывающим тензор напря-

жений  $\hat{\sigma}$  с «внешними» силами  $\vec{f}$ , действующими на тело, и ускорением его отдельных точек:

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} + \vec{f} = \rho \vec{a}.$$

На рис. 4 приведены расчеты НДС двухслойной насыпи высотой 12 м на прочном основании, верхние 6 м насыпи представлены прочным грунтом, а нижние 6 м более слабым.

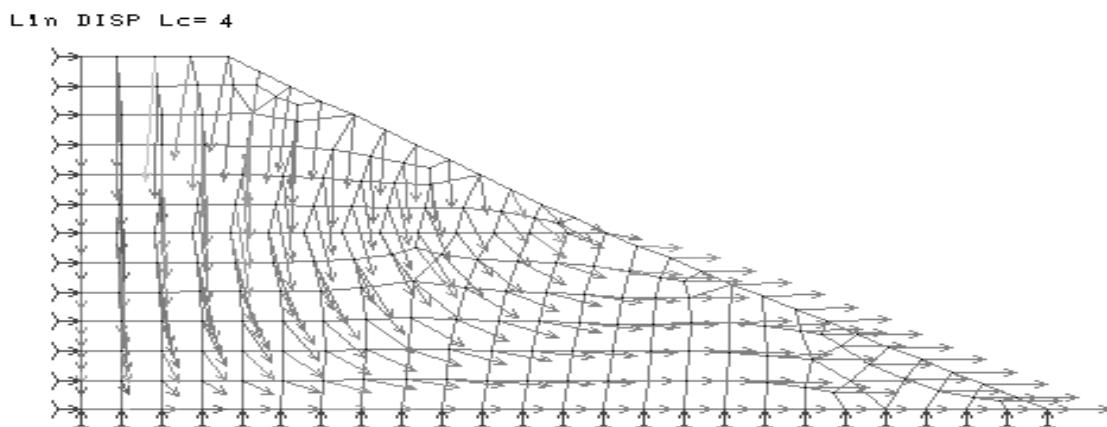


Рисунок 4 – Векторный график деформаций насыпи высотой 12 м на прочном основании

Из рис. 4 видно, что слой нижнего грунта деформируется с растеканием. Как показали расчеты, нижний – менее прочный слой грунта, имеет характерные деформации расплазания насыпи (рис. 4). На рис. 5 приведены результаты расчетов НДС этих насыпей и графики распределения деформаций.

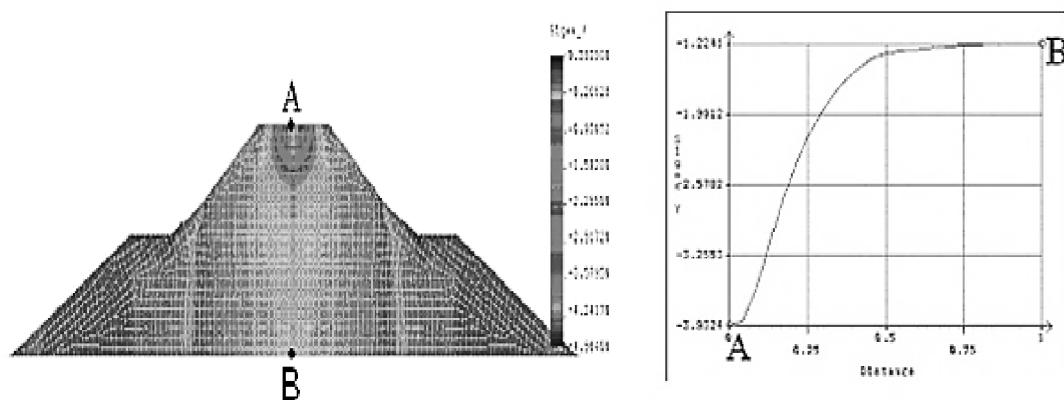


Рисунок 5 – Распределение вертикальных напряжений в грунте насыпи от поездной нагрузки при устройстве берм. Линия А-В – вертикаль по оси

В результате численных расчетов двухслойной железнодорожной насыпи получены решения для 3 случаев: упругое решение; нелинейное решение; с учетом ползучести грунта насыпи. Рекомендуется использовать для расчетов НДС слоистой насыпи разработанную нами конечно-элементную виртуальную модель пути, включающую верхнее

строение и земляное полотно.

Для оценки возможной пластической деформации менее прочного слоя грунта насыпи («расползания насыпи») рекомендуется рассчитывать векторный график перемещения грунта насыпи под поездной нагрузкой. Если касательные напряжения от нагрузки превысят допустимые напряжения грунта, линии перемещения частиц грунта будут заметно отклоняться от вертикали, и это является указанием необходимости усиления слоистой насыпи.

Список литературы

1. Токмурзин О.Т. Напряженное состояние откоса и устойчивость бортов карьеров ресурсоосберегающей формы / О.Т. Токмурзин, Т.Т. Ипалаков. - Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1991. - 81 с.
2. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. - Л.: ВНИМИ, 1972. - 165 с.
3. Попов И.И. Устойчивость породных отвалов / И.И. Попов, П.С. Шпаков, Г.Г. Поклад. - Алма-Ата: Наука, 1987. - 224 с.
4. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. для строит. спец. вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов. - М.: Выш. шк., 1990. - 440 с.
5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. - М.: Недра, 1987. - 221 с.
6. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс). - М.: Выш. Шк., 1983. - 288 с.

Получено 29.10.215

---

УДК 622.831

**Т.Т. Ипалаков, Б. Апшикур, Е.Н. Сагымбаев**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск

**НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ НАСЫПНЫХ ПОРОД**

С насыпными породами, т.е. искусственными сооружениями, мы встречаемся при возведении железнодорожных насыпей и выемок, а также при устройстве горных отвалов.

Инженерно-геологические условия, существующие на территории Республики Казахстан, таковы, что около 50 % горных пород литосферы состоят из глинистых грунтов делювиального, пролювиального, аллювиального и эолового происхождения, лессов, лессовидных суглинков и супесей.

Искусственные сооружения на железных дорогах – насыпи и выемки земляного полотна – устраиваются, как правило, из местных грунтовых материалов с нарушением их природного сложения, имеющих тенденцию к изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) как в процессе строительства, так и в условиях длительной эксплуатации.

НДС грунтовых сооружений зависит не только от воздействия внешних факторов, но и от физической природы грунтов, слагающих массив. Основными параметрами, используемыми в расчётах на устойчивость, являются прочностные характеристики грунтов – угол внутреннего трения или коэффициент трения, удельное сцепление. Основными параметрами, используемыми в расчетах осадок, являются деформационные характеристики грунтов: модуль деформации и коэффициент поперечного расширения (коэффициент

Пуассона). Если для песчаных грунтов вопрос определения этих характеристик как в условиях статического, так и динамического и пульсирующего нагружения, в той или иной степени решается, то для глинистых грунтов у исследователей нет единого мнения по оценке НДС, особенно при действии квазистатических, динамических и пульсирующих нагрузок.

Развитие открытого способа разработки месторождений полезных ископаемых связано, в первую очередь, с увеличением глубины карьеров и увеличением объемов вскрышных пород, размещаемых в отвалах. Это происходит на фоне все возрастающих требований к охране окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов. В этих условиях принимаемые технические решения по обоснованию оптимальных параметров отвалов должны оказывать существенное влияние не только на экономические показатели работы горного предприятия, но и на социальные и экологические последствия.

К настоящему времени уровень решения вопросов управления устойчивостью отвалов нельзя признать полностью отвечающим запросам горного производства, о чем свидетельствуют нередкие случаи возникновения серьезных деформаций отвальных массивов.

На сегодняшний день, отвалы представляют собой сложные инженерные сооружения значительной высоты, многие из которых уже достигли критических параметров, допустимых для данных инженерно-геологических условий. Однако сохраняется тенденция их увеличения, т.к. для проектирования и строительства новых отвалов необходимо отчуждение земель, разработка новых технологических схем транспортирования вскрышных пород, что требует значительных капитальных вложений.

На основе анализа работ, посвященных изучению природы прочности и деформируемости насыпных пород различной литогенетической принадлежности, можно сформулировать представление о геомеханической модели искусственного сооружения, рассматривающее насыпную массу, во-первых, как структурированное минеральное образование, которое благодаря прочности структурных связей способно воспринимать внешние нагрузки без разрушения, а вследствие дискретности - обладает водопроницаемостью и способностью деформироваться при изменении напряженного состояния, и, во-вторых, как динамическую многофазную систему, в которой энергия взаимодействия между твердыми и жидкими компонентами изменяется в ходе деформирования, что в общем случае определяет непостоянство свойств пород, нелинейность зависимостей «напряжение–деформации», нестационарность развития деформаций во времени (рис. 1). Механическое или гидродинамическое воздействие вызывает в насыпных породах развитие процессов:

- структурной реорганизации (структурные деформации);
- уравновешивания соотношения фаз в соответствии с изменением физических полей напряжений (фильтрационные деформации);
- реализации межфазового взаимодействия, изменяющего энергию взаимосвязи между структурными элементами (пластические деформации).

В зависимости от индивидуальности пород определяющее влияние на динамику и результаты развития деформаций, могут оказывать один или более видов адаптационных процессов. Соответственно, породы могут характеризоваться деформационным поведением структурного, структурно-пластического, структурно-фильтрационно-пластического и фильтрационно-пластического типа. Все это определяет большое многообразие видов деформаций искусственных сооружений. Наиболее характерными из которых являются оползни, обрушения и обвалы, осьпи и оплывины, просадки (рис. 2).

Одним из самых распространенных видов деформаций откосов насыпных искусственных сооружений являются осьпи. Они характерны для откосов устоявшихся отвалов

---

и проявляются в виде отрыва отдельных частиц и кусков на поверхности отвального массива и скатывания их к подошве откосов. Осыпи происходят в результате физического и химического выветривания горных пород под воздействием воздуха, ветра, солнца, атмосферных осадков, температурных колебаний и т. п. По мере высыхания и растрескивания частицы пород теряют связность и не могут удержаться на поверхности откоса силами трения. В особой мере это относится к насыпям глинистых пород, отличающихся малой стойкостью против выветривания, интенсивность которого в значительной степени определяется минералогическим составом пород на поверхности откоса.

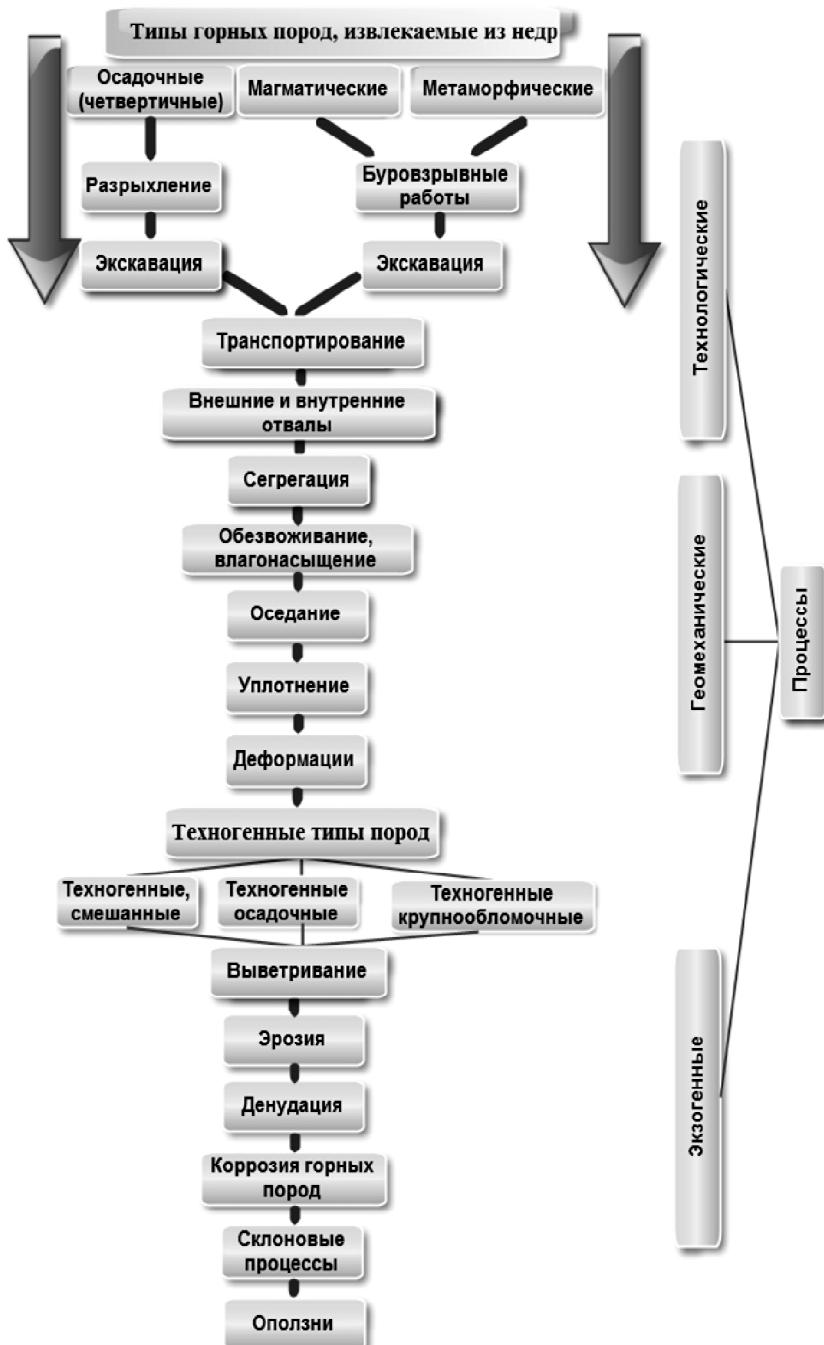


Рисунок 1 – Классификация технологических, геомеханических и экзогенных процессов в насыпных массивах



Рисунок 2 – Основные виды деформаций насыпных искусственных сооружений

Деформации осыпания откосов, имея сравнительно небольшой объем, сами по себе непосредственно на общую устойчивость сооружений не влияют.

При складировании переувлажненных пород возникают оплывины, характеризующиеся смещением к основанию насыпей водонасыщенных тонкозернистых и пылеватых песчано-глинистых пород в виде грязевых потоков. Интенсивному развитию оплывин предшествуют, как правило, весенние паводки и дождливые периоды. Кроме того, оплывины развиваются также в весенне-летний период при насыщении водой отвальных пород в результате таяния снега, попадающего в отвал вместе с породой в зимнее время. Оплывины отличаются от оползней отсутствием поверхностей скольжения.

Просадки искусственных сооружений характеризуются вертикальным смещением прибортовых участков отвальных масс без образования сплошной поверхности скольжения. Они возникают в результате уплотнения отвальных пород под действием собственной массы или массы транспортного оборудования, увлажнения пород и наличия в основании отвала слабых пластичных пород, склонных к выдавливанию. Просадки насыпей обычно сопровождаются развитием трещин и заколов, развивающихся сериями параллельно бровке отвалов. Такие деформации зачастую являются начальной стадией оползней, в первую очередь, бульдозерных насыпей. Наиболее распространенный и опасный вид деформаций отвальных масс – оползни (рис. 3).



Рисунок 3 – Оползни насыпных искусственных сооружений

Оползни насыпей характеризуются смещением породных масс по поверхности скольжения. В зависимости от объема, различают мелкие (сотни и тысячи кубических метров), средние (десятка тысяч), крупные (сотни тысяч) и очень крупные (миллионы кубических метров) оползни. Оползни насыпных искусственных сооружений образуют самостоятельную группу оползневых деформаций и классифицируются в зависимости от положения поверхности скольжения. Как показывает опыт изучения оползневых процессов, режим развития оползневых деформаций во времени, критические значения подвижек и скорости смещения характеризуются большим разнообразием в зависимости от типа оползня, реальных условий, масштабов и фаз развития оползневого процесса. Тем не менее, можно выделить следующие этапы развития оползней (рис. 4). На начальной стадии развития оползня наблюдается увеличение напряжений при эрозионном (абразионном) или техногенном воздействии на отвал, образование трещин растяжения, оконтуривание трещинами тела оползня. Начало оседания поверхности с образованием западины, появление вала выпирания в основании отвала.

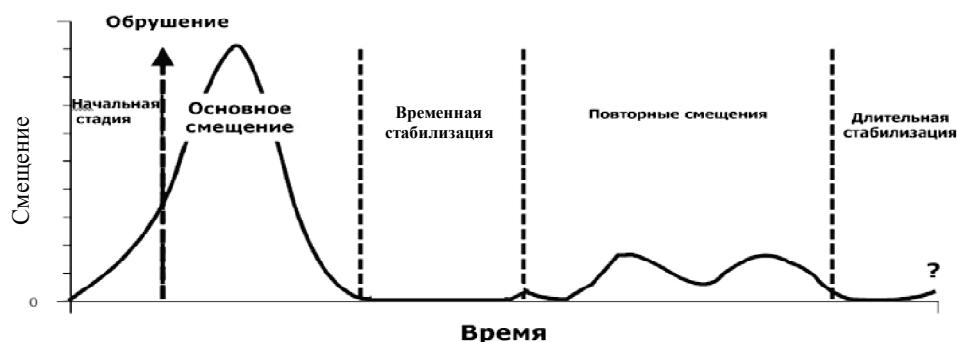


Рисунок 4 – График развития оползневых деформаций

Затем происходит основное смещение оползня. Отчленение оползневых тел и основное их смещение (по величине). Регрессивное или прогрессивное развитие. Проявление различных форм и скоростей движения частей оползневых тел.

Следующий этап – временная стабилизация. Наблюдается неизменность формы насыпи. Отсутствие появления свежих трещин растяжения.

Дальнейшее развитие оползня происходит, как правило, с повторными смещениями и образованием оползней последующих генераций с характерными признаками, присущими предыдущим стадиям.

Важное значение для практики имеет классификация оползней по типам механизма смещения оползневого тела. Как правило, можно выделить четыре типа (рис. 5): регрессивный, прогрессивный, переходный и дискретный.

Как показал опыт изучения оползневых процессов насыпных искусственных сооружений, режим развития оползневых деформаций во времени, критические значения подвижек и скорости смещения характеризуются большим разнообразием в зависимости от типа оползня, реальных условий, масштабов и этапа развития оползневого процесса.

В основу существующей системы оценки несущей способности насыпных грунтов заложен метод предельных состояний, являющийся также основным расчетным методом при их проектировании. Два предельных состояния доминируют при расчете подобных искусственных сооружений, а именно: потеря устойчивости формы равновесия под действием нагрузок (расчет на устойчивость), превышение деформациями допустимых зна-

чений (расчет осадки).

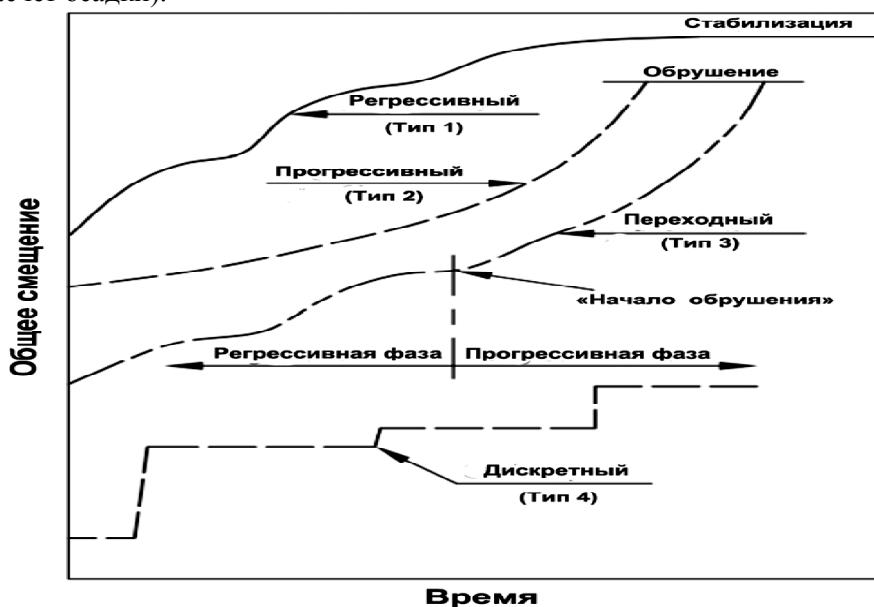


Рисунок 5 – Типы механизмов деформаций насыпных искусственных сооружений

Рассматриваемые искусственные сооружения обычно работают в условиях сложного воздействия разнообразных нагрузок. Помимо нагрузок от собственного веса, действуют вертикальные нагрузки от подвижного состава, горизонтальные силы от торможения, сейсмические силы при землетрясениях и многие другие. При расчетах устойчивости не менее важным является устойчивость основания этих сооружений.

Таким образом, практика эксплуатации насыпных пород показывает, что превышение допустимых значений деформаций и потеря устойчивости происходит при изменении НДС объекта, вызванного самыми различными причинами природного и техногенного характера. Задача оценки НДС насыпей и выемок земляного полотна, сложенных глинистыми грунтами, полускальными и скальными породами, требует учёта всех действующих факторов, способных привести к изменению НДС.

#### Список литературы

1. Звонарев Н.К. Предварительный расчет параметров осыпания откосов на карьерах в результате выветривания / Н.К. Звонарев, С.В. Кагермазова // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. - 1969. - № 12. - С. 68-75.
2. Кириченко Ю.В. Современные методы и способы контроля геомеханических процессов в намывных горнотехнических сооружениях // Горный инф.-аналит. бюлл. - М.: МГГУ, 1998. - Вып. 6. - С. 90-94.

Получено 29.10.2015

