

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК 622.502

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНОГЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ

К. Н. Трубецкой, Ю. П. Галченко, Г. В. Сабянин

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Рассмотрены условия и особенности формирования в литосфере нового экологического объекта — техногенно измененных недр. Выдвинута и разработана гипотеза о формировании геофизического экотона и приведена методика определения значений экологических индикаторов для этого объекта применительно к подземному способу освоения минеральных ресурсов.

Литосфера, техногенно измененные недра, геофизический экотон, напряженно-деформированное состояние, массив, экологические индикаторы, индекс, плотность

Обеспечение геоэкологической безопасности при освоении недр связано с фундаментальной научной проблемой геомеханики по исследованию влияния техногенных нагрузок на протекающие в динамических структурах литосферы процессы и требует решения двуединой научной задачи: раскрытие закономерностей изменения свойств природных объектов литосферы при техногенном вторжении в них для получения минерального сырья и определение условий постоянного воспроизводства при этом устойчивых динамических структур, в которых не возбуждается катастрофических литосферных явлений.

Первая часть этой задачи, в свою очередь, состоит из двух разнохарактерных элементов, тесно детерминированных друг с другом через единство конечной цели, для достижения которой необходимо:

— дать модельное представление о техногенно измененных недрах как об объекте, возникающем в литосфере при техногенном вторжении в нее с целью освоения минерально-сырьевых ресурсов;

— дать обобщенную модель процессов этого вторжения как причины такого локального изменения свойств невозмущенной литосферы, которое позволяет выделить участки с измененными свойствами в качестве нового типа литосферного объекта.

Исходя из существующих представлений о физической модели твердого тела и физических постулатах механических моделей, изложим представления, на которых построена предлагаемая механическая модель невозмущенной литосферы как твердого тела со структурой.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ № НШ-711.2012.5 и Российского фонда фундаментальных исследований № 12-05-00011.

Твердое тело представляется некоторой идеальной сплошной средой, деформации которой под действием внешних сил полностью обратимы, если только внутренние напряжения не превышают своих предельных значений, характеризующих прочность данного тела. Вместе с тем в твердом теле рассеяны равномерно по объему разномасштабные неоднородности, и расстояния между неоднородностями каждого размера много больше их собственного размера. Эти неоднородности ответственны за необратимые деформации: на них напряжения концентрируются и со временем релаксируют. Будем полагать механизм диссипации механической энергии в твердом теле — единственным [1].

При любой заданной скорости деформации диссипация энергии деформирования осуществляется неоднородностями только одного размера (точнее, в узком интервале размеров).

В работах [1, 2] показано, что уравнение для избыточных (над упругим уровнем) напряжений на неоднородностях может быть, например, представлено в следующем виде:

$$\frac{d\Delta\sigma_1}{dt} = \rho c^2 \varepsilon - \nu \frac{\Delta\sigma_1}{l},$$

где $\Delta\sigma_1$ — избыточное напряжение на неоднородности размером l ; c — скорость упругих волн (поперечных); ρ — плотность твердого тела; ε — скорость деформации сдвига в твердом теле; ν — константа, отражающая скорость релаксации напряжений.

Главным в этом уравнении является вывод о том, что скорость релаксации напряжений на неоднородности пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна размеру неоднородности.

Для рассматриваемой проблемы принципиальное значение имеет также вывод авторов работы [1] о том, что блочное строение земной коры придает ей подвижность и снижает неупругие напряжения внутри блоков. Деформация коры за счет смещения блоков относительно друг друга создает условия для возникновения локальных высоконапряженных областей в качестве реакции на перемещение блоков. В остальном внутриблоковом пространстве, как правило, имеет место статическое равновесие и механические свойства стабильны.

Рассматривая вторую часть фундаментальной задачи об обобщенной модели процессов техногенного изменения литосферы при извлечении из нее полезных ископаемых, воспользуемся общими представлениями об этом процессе, приведенными в [3].

Для осуществления главной целевой функции добычи минерального сырья — включения части ресурсов литосферы в оборот вещества и энергии техносферы — необходимо обеспечить доступ с земной поверхности к месту залегания полезного компонента, придать этому компоненту подвижность и выдать его в этом состоянии на поверхность Земли. Таким образом обобщенная функциональная модель техногенного изменения недр при добыче минерального сырья включает в себя три обязательных этапа:

- доступ с поверхности к месту дислокации в литосфере участка с полезными свойствами;
- придание подвижности полезному компоненту, залегающему в литосфере;
- выдача полезного компонента в подвижном состоянии на поверхность Земли.

Доступ с поверхности к рудному телу осуществляется на стадии вскрытия месторождения путем проведения вертикальных, горизонтальных или наклонных вскрывающих выработок и системы выработок горно-капитальных. Это первая составляющая геотехнологии. Вторая составляющая включает в себя весь комплекс добычных работ, а также управление горным давлением. И наконец, третья составляющая охватывает все работы по транспортированию горной массы в подземных выработках и ее подъем на земную поверхность. В результате литосфера

подвергается масштабным изменениям как в количественном, так и в качественном смысле. Материал литосферы извлекается на поверхность и включается в оборот вещества и энергии экосистем вне равновесной системы самой литосферы. Экологическая оценка этого процесса имеет две стороны: с одной — формирование объемных полостей вызывает изменение напряженно-деформированного состояния окружающего массива горных пород, с другой — огромные объемы инертного вещества в той или иной форме размещаются в живых экосистемах на земной поверхности, кардинально изменяя их состояние. В первом случае можно говорить о формировании нового литосферного объекта, который обозначен в работе [4] как техногенно измененные недра и идентифицирован в работе [2] как новый экологический литосферный объект. По аналогии со структурой зон техногенного поражения биоты, в состав зоны геоэкологических изменений (техногенно измененных недр) входят участки полного нарушения первоначального состояния участка (объема) литосферы, вплоть до его изъятия из ее состава. Это объем полного техногенного поражения литосферы. Вокруг него формируется пространство, в пределах которого материал литосферы сохраняет свое агрегатное состояние, но меняет свойства (трещиноватость, напряженно-деформированное состояние и т. д.). Размеры и форма данного пространства определяются естественными свойствами материала литосферы и характером техногенных преобразований участка полного разрушения литосферы. Трансформируя для этих условий классическую триаду экологии (загрязнение — транзитная среда — депонирующая среда), можно сформулировать следующее построение: разрушение некоторого объема первично равновесной литосферы приводит к искажению геофизических полей (загрязнение); через транзитную среду — поле тяготения Земли — это “загрязнение” передается в нетронутые участки литосферы и приводит их в новое напряженно-деформированное состояние (депонируется в них). Принятие такой схемы взаимодействия по аналогии с теоретической экологией означает наличие внешней границы у зоны загрязнения, на которой все загрязнение депонировано элементами первичной системы.

Таким образом, **техногенно измененные недра можно представить как некий объем, окруженный неизменной литосферой, внутри которого находится зона техногенного разрушения литосферы и зона спровоцированного этим разрушением изменения напряженно-деформированного состояния ее пород [3].**

Для описания зоны полного разрушения литосферы (объем, оставшийся после выемки полезного ископаемого) можно воспользоваться известной моделью движения в гравитационном поле Земли плотностных неоднородностей, представив процесс извлечения части литосферы как процесс развития и движения неоднородностей с нулевой плотностью [1]. Так как понятие “техногенно измененные недра” включает в себя участки (объемы) литосферы, затронутые сопутствующими изменениями состояния горных массивов без изменения их плотности, то принципиальное значение приобретает вопрос о внешней границе этих сопутствующих изменений состояния, т. е. вопрос о границах нового техногенного литосферного объекта с первичной литосферой.

Задача о переходах между двумя системами с различными свойствами является классической задачей теоретической экологии, в которой есть понятие “экотона” как зоны перехода между различными биологическими сообществами, где проявляются встречные влияния этих сообществ [5]. Следовательно, экотон представляет собой полосу, в пределах которой свойства контактирующих систем вырождаются до нуля. Закон вырождения свойств в каждом конкретном случае будет определяться свойствами систем и характером их взаимодействия.

Гомеостатическая трансформация этого биологического понятия в геомеханику возможна на основе дискретной модели организации геопространства, в границах которого геофизический экотон может быть детализирован в виде сложной объемной системы, прилегающей к зоне техногенного разрушения, обладающей внутренней неоднородностью изменения свойств и континуальной границей с невозмущенной литосферой. То есть техногенно измененные недра можно представить в виде замкнутого объемного литосферного объекта, ограниченного в пространстве двумя условными поверхностями “нулевого” влияния контактирующих систем. На внутренней поверхности не проявляется влияние невозмущенной литосферы, а на внешней — техногенно измененных недр.

Согласно доминирующим в настоящее время подходам к описанию напряженно-деформированного состояния массивов горных пород при разработке месторождений, в каждой точке рассматриваемого участка массива существуют три таких взаимно ортогональных направления, при которых все касательные компоненты тензора напряжений имеют нулевые значения. Отличными от нуля остаются только три нормальных напряжения: σ_1 , σ_2 и σ_3 , называемые главными значениями тензора напряжений или главными нормальными напряжениями. Направления действия главных нормальных напряжений называют главными осями напряжений [6].

Нетронутый массив горных пород на достижимых при разработке твердых полезных ископаемых глубинах можно рассматривать, с известной условностью, как сплошную среду с упругими свойствами, так как давление здесь достаточно для закрытия трещин, но еще не вызывает структурных нарушений. В этом случае главное напряжение в вертикальной плоскости σ_3 всегда определяется весом пород вышележащей толщи и для различных плотностей (объемных весов) покрывающих пород имеет вид

$$\sigma_3 = \sum_0^H \gamma_i h_i,$$

где γ_i — объемный вес i -го слоя пород; h_i — мощность i -го слоя; H — глубина рассматриваемой точки от дневной поверхности.

Если напряженное состояние массива пород определяется только действием гравитационных сил, то каждый элементарный объем под действием вертикального гравитационного напряжения будет испытывать деформации сжатия и растяжения в вертикальном и горизонтальном направлении соответственно. Однако последнему препятствует реакция окружающих пород, в результате чего возникают горизонтальные сжимающие напряжения σ_1 и σ_2 , численно равные

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \lambda \gamma H = [\mu / (1 - \mu)] \gamma H,$$

где λ — коэффициент бокового давления, показывающий, какую часть вертикальной нагрузки, действующей в рассматриваемой точке массива, составляют силы или напряжения, действующие в горизонтальной плоскости; μ — коэффициент Пуассона.

Для горных пород коэффициент Пуассона изменяется от 0.2 до 0.5. Более высокие значения относятся к плотным монолитным породам и большим глубинам. При $\mu = 0.2 - 0.4$ напряжения σ_x и σ_y составят $(0.25 - 0.67)\gamma H$. Максимальные касательные напряжения при $\mu = 0.2$ и $\mu = 0.4$ равны соответственно 0.37 и $0.17\gamma H$. Таким образом, касательные напряжения в нетронутом массиве оказываются ниже максимальных нормальных напряжений в 2.5 – 5 раз [6].

Для решения задач по экологической оценке уровня техногенных изменений участков литосферы принципиальное значение имеет тот факт, что горизонтальные составляющие общего тензора напряжений связаны с гравитационной составляющей. Это позволяет построить систему

показателей экологической оценки применяемых геотехнологий как главных факторов, определяющих исходное состояние массивов горных пород в границах техногенно измененных недр, исключительно на изучении вертикальных напряжений. Согласно методике, предложенной Организацией экономического сотрудничества и развития и Программой ООН по окружающей среде, состояние экологического объекта характеризуется тремя индикаторами [7]:

- индексом состояния (экологическим индексом), который определяется как относительная величина изменения показателей, характеризующих состояние экологического объекта;
- площадью (или размером) экологического объекта на земной поверхности;
- плотностью индекса состояния, характеризующей интенсивность изменения индекса состояния в пределах зоны этого изменения.

Применительно к рассматриваемой проблеме экологической оценки изменения состояния массивов горных пород при формировании техногенно измененных недр в процессе отработки месторождений твердых полезных ископаемых экологический индекс для любой точки, независимо от направления вектора напряжений, можно определить из выражения

$$J_i = \frac{|\sigma_i|}{|\sigma_{ис}|},$$

где σ_i и $\sigma_{ис}$ — соответственно измененное и исходное вертикальное напряжение, МПа.

Общий индекс экологического состояния техногенно измененных недр составит

$$J_{ср} = \frac{1}{r_3} \int_0^{r_3} f(r_3) dr,$$

где r_3 — приведенный радиус фигуры техногенно измененных недр, м; $f(r_3)$ — функция, описывающая характер изменения локального индекса (J_i) по мере удаления от центра вынимаемой полости.

При использовании гидростатической модели формирования поля вертикальных напряжений индекс состояния литосферы принимает вид относительного изменения изучаемого геофизического параметра. Так как с точки зрения экологических последствий принципиальное значение имеет техногенное изменение первоначального состояния, то учитывается только реально определенное отклонение изучаемого параметра:

$$J_{л_3} = \frac{|\sigma_i - \sigma_{ис}|}{|\sigma_{ис}|},$$

где $J_{л_3}$ — индекс состояния массива в изучаемой точке геофизического экотона.

Вторым показателем, характеризующим изменение состояния экологического объекта, является его площадь на земной поверхности. Это означает, что должно существовать критическое значение антропогенного нарушения, по которому устанавливают внешнюю границу зоны нарушения и определяют ее положение в пределах первичной экосистемы. В методическом отношении возможны два подхода к определению критических значений антропогенных факторов.

Если экологические последствия хозяйственной деятельности человека приводят к поступлению в природную среду веществ, ранее в ней не присутствовавших, или к изменению исходных значений каких-либо элементов, входящих в структуру экосистемы, то граница зоны экологического нарушения имеет континуальный характер и проводится по линии, где воздействие становится равным либо природному фону для техногенных поллютантов, либо верхнему пределу толерантности (верхнему пессимуму) для структуроопределяющих элементов биоты [8].

Для воздействий, связанных с изъятием участков естественной биоты под размещение техногенных объектов различного назначения и под земельные отводы предприятий, внешняя граница, естественно, носит дискретный характер и устанавливается, как правило, без учета экологических ограничений.

В рассматриваемом нами случае имеет место первый вариант, когда граница зоны техногенного изменения исходного поля напряжений проводится по условию равенства фактических напряжений в геофизическом экотоне их исходным значениям.

В экологических терминах размер участка литосферы как экологического объекта можно представить в виде приведенного радиуса (r_3) зоны техногенного изменения напряженно-деформированного состояния участка литосферы (геофизического экотона), внутренняя граница которого совпадает с внешней границей зоны полного разрушения литосферы (зоны добычных работ), а внешняя — является геометрическим местом точек, в которых напряжения уравниваются с исходными.

Так как структура техногенно измененных недр включает в себя также зону полного техногенного разрушения литосферы, то размер зоны техногенного изменения литосферы ($r_{л}$) определится из выражения

$$r_{л} = \sqrt[3]{\frac{3A_{г}}{4\pi}} + r_3,$$

где $A_{г}$ — годовой объем добычи руды, m^3 .

Общий индекс ($J_{л}$), характеризующий экологическое состояние литосферы, составит:

$$J_{л} = \left(J_{д} \sqrt[3]{\frac{3A_{г}}{4\pi}} + J_{л_3} r_3 \right) / \left(\sqrt[3]{\frac{3A_{г}}{4\pi}} + r_3 \right),$$

где $J_{д}$ — экологический индекс в зоне добычных работ, который в большинстве случаев можно считать равным 1.

Для характеристики динамики изменения состояния массива в пределах техногенно измененных недр, по аналогии с индексом плотности биологического экотона, может быть использован показатель плотности индекса состояния массива ($q_{л_м}$), определяемый как отношение изменения индекса к линейному размеру зоны этого изменения:

$$q_{л_м} = \frac{J_{л_н} - J_{л_к}}{L_к - L_н} \text{ (1/м)},$$

где $J_{л_н}$ и $J_{л_к}$ — соответственно состояния массива в крайних точках изучаемого диапазона; $L_к$ и $L_н$ — расстояния от границы зоны полного разрушения литосферы (добычи полезного ископаемого).

В пределах техногенно измененных недр это выражение принимает вид

$$q_{л_м} = 1 / \left(\sqrt[3]{\frac{3A_{г}}{4\pi}} + r_3 \right) \text{ (1/м)}.$$

Изучение напряженно-деформированного состояния массива — необходимая составная часть исследований по выбору геотехнологий и определению их параметров. В ходе этих исследований определяют значения тех или иных напряжений, возникающих в массиве в результате ведения горных работ. Определения осуществляют в критических точках контуров создаваемых техногенных полостей с целью обеспечения устойчивости обнажений и целиков.

Появление возможности и методики экологической оценки техногенных изменений напряженно-деформированного состояния нарушаемых горными работами участков литосферы позволит ранжировать по этим признакам применяемые геотехнологии, т. е. сделать еще один шаг к созданию инженерной основы для реализации концепции устойчивого развития природы и общества.

ВЫВОДЫ

Техногенное нарушение литосферы в процессе освоения месторождений полезных ископаемых приводит к формированию нового литосферного объекта — техногенно изменяемых недр.

Техногенно изменяемые недра являются новым экологическим объектом, включающим в себя зону полного разрушения и изъятия материала литосферы и геофизический экотон, свойства и размеры которого определяются условиями формирования зоны полного разрушения.

Количественная оценка изменения экологического состояния литосферы возможна путем определения индекса состояния литосферы, его плотности в пределах техногенно изменяемых недр, а также размером зоны изменения состояния литосферы, включающего в себя приведенный радиус полости, образованной в процессе добычи полезного ископаемого, и ширину геофизического экотона с учетом континуального характера его внешней границы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. — М.: Недра, 1986.
2. Чаплыгин Н. Н., Галченко Ю. П., Папичев В. И., Жулковский В. Г., Сабянин Г. В., Прошляков А. П. Экологические проблемы геотехнологий: Новые идеи, методы и решения. — М.: Научтехлитиздат, 2009.
3. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Родионов В. Н., Замесов Н. Ф., Куликов В. И. Структура техногенно измененных недр при их освоении // Вестн. РАН. — 2002. — Т. 72. — № 11.
4. Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли / РАН, АГН, РАЕН, МИА; под ред. К. Н. Трубецкого. — М.: Изд-во АГН, 1997.
5. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Бурцев Л. И. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества. — М.: Научтехлитиздат, 2003.
6. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1989.
7. Голубев Г. Н. Геоэкология. — М.: Аспект-Пресс, 2006.
8. Соболев Н. А., Евстигнеев О. И. Ландшафтно-картометрические критерии и методы // Критерии и методы формирования экологической сети природных территорий. — Вып. 1. — 2-е изд. — М.: Центр охраны дикой природы СоЭС, 1999.

Поступила в редакцию 15/1 2014