

УДК 622.831.32
© Б.В. Лаптев, 2010

О СКОРОСТИ ОСЕДАНИЯ ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ПОРОД



Б.В. Лаптев,
д-р техн. наук,
эксперт
(ЗАО НТЦ ПБ)

The mechanism and subsequent algorithm on in-place analysis of the relation between the undermined earth surface rates of subsidence and mine technical and mining-and-geological factors during mineral deposits underground extraction.

Ключевые слова: скорость сдвижения подрабатываемой поверхности, горно-геологические и горнотехнические параметры, эмпирические зависимости сдвижения подрабатываемого массива, статистика.

Наблюдения за процессом сдвижения горных пород и земной поверхности при их подработке обычно проводят для получения конечных результатов —

углов сдвижения, наибольшего оседания, т.е. определения параметров, с которыми заканчивается процесс сдвижения. Большинство таких наблюдений на многих разрабатываемых месторождениях осуществляется крайне редко, иногда один раз в год, что не дает возможности судить о характере протекания процесса от начала до конца.

Отсутствие частотных наблюдений, непрерывно регистрирующих оседания на определенном отрезке времени, препятствует выяснению механизма сдвижения пород. При этом отсутствует возможность регистрации такого параметра, как скорость оседания подрабатываемого массива пород, который зачастую оказывает преобладающее влияние на безопасное состояние подрабатываемых объектов на земной поверхности и подземных горных выработок.

Из теорий проф. Л.П. Леонтовского и А.С. Ржиха следует, что подрабатываемая поверхность оседает однообразно по мере выполаживания в толще пород линий, ограничивающих область сдвижения, они передвигаются вслед за движущимся забоем, фронтом очистных работ. По мнению проф. В.Д. Слесарева, после того как сдвижение пород дойдет до поверхности, в подрабатываемом массиве образуется некоторая постоянная зона, которая следует за движущимся фронтом горных работ и которую он называет «катящейся» зоной Тромптера. Считается, что при равномерном движении забоя эта зона будет передвигаться непрерывно и, следовательно, поверхность будет сдвигаться непрерывно и однообразно.

Теория однообразного и непрерывного сдвижения обуславливает и однообразное движение вслед

за забоем любой характерной точки на кривой оседания, например точки перегиба, являющейся точкой максимума скорости оседания поверхности. На всех разрабатываемых угольных, рудных и углеводородных месторождениях наблюдения подтверждают примерную повторяемость процесса образования мульды. Что касается однообразия и равномерности сдвижения поверхности, которое должно вытекать из существа указанных теорий, ряд исследователей в ряде случаев обнаружили некоторое несогласие с этим.

Поверхность, затронутая движением при непрерывном подвигании забоя очистной выработки, например при подземной разработке угольных месторождений, будет непрерывно сдвигаться в результате перемещения линии забоя (динамическая причина) и частично в результате уплотнения обрушившихся масс (статическая причина). В этом движении горных пород впервые С.Г. Авершиным обнаружены вторичные явления — периодические увеличения и уменьшения скорости движения, которые происходят на фоне постоянного непрерывного движения среды, представляющей массу перекрывающих горных пород [1].

На некоторых крупных многопластовых и длительно разрабатываемых месторождениях углеводородов (например, в США, Венесуэле, на Северном море) отмечены значительные просадочные явления с переменной скоростью. На нефтяном месторождении района Маракайбо (Венесуэла) максимальная просадка земной поверхности составила 4 м, а максимальное горизонтальное смещение — 24 мм. В некоторых локальных местах выявлены опускания до 39 см. За двухлетний период наблюдений было установлено появление на поверхности систем трещин шириной до нескольких дециметров и глубиной до 3 м и более [2].

На многих нефтегазоносных месторождениях, в том числе в пределах платформ, обнаружен высокий уровень современных деформационных

процессов, протекающих в геологической среде. Основная их форма проявления — аномальная современная активность разломов, с которыми коррелируют зоны нефтегазоаккумуляции и отдельные месторождения углеводородов. Например, скорость вертикальных и горизонтальных смещений по таким разломам достигает 5–7 см/год [3]. Часто подобные смещения провоцируют техногенные землетрясения с магнитудой более 7. По мнению автора, увеличение или уменьшение скорости просадок на углеводородных месторождениях связаны с изменением скорости извлечения из недр или наоборот закачки в них флюидов. Наиболее ярким примером тому может быть отработка Ромашкинского месторождения нефти (Республика Татарстан).

Относительно периодичности изменения скорости оседания земной поверхности при подземной отработке угольных пластов С.Г. Авершиным была выдвинута следующая гипотеза [1]. Явление периодических затуханий и усиления сдвижения указывает на периодическое образование в толще движущихся подработанных пород таких зон, в которых горизонтальные составляющие действующих сил, горизонтальный распор достигают величин, способных замедлить сдвижение. Зону замедленного сдвижения С.Г. Авершин назвал «разгружающей зоной», которая имеет сводообразную форму. Под зоной подразумевается некоторая область, внутри которой сдвижение пород затруднено, в силу чего скорость его снижается и уменьшается скорость сдвижения пород, лежащих вне этой полосы.

По мере подвигания забоя, увеличения размеров выработанного пространства «разгружающая зона» перемещается вверх к земной поверхности, захватывая все большую и большую область. Вблизи поверхности эта зона разрушается, что сопровождается увеличением скорости сдвижения слоев пород, прилегающих к поверхности. После этого наступает затухание скорости ее сдвижения. При дальнейшем подвигании забоя будет образовываться новая «разгружающая зона» и т.д. Данный процесс можно ассоциировать с процессом всплывания воздушного пузырька в воде, когда он достигает водной поверхности и лопается, а на его месте образуется воронка. В подземных горных выработках аналогично наблюдается периодическое ухудшение или улучшение их состояния.

По мнению С.Г. Авершина, при подработке различных сооружений без оставления предохранительных целиков необходимо учитывать явление периодического нарастания скорости сдвижения. Этим обстоятельством он объясняет случаи, когда в одних и тех же условиях одни подработанные сооружения остались неповрежденными, а другие получили повреждения.

Для Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей, отработка которого ведется камерной системой с оставлением междукамерных целиков различной степени жесткости, оседание подработанной земной поверхности на разных участках происходит часто с различной скоростью. Последняя зависит, главным образом, от степени нагружения или степени податливости охраняемых и предохранительных целиков. В то же время, при идентичных горнотехнических и принимаемых в расчетах ожидаемых сдвижений земной поверхности горно-геологических параметрах фиксируются аномально высокие (выше расчетных) скорости оседаний. Ранее ряд исследователей (С.Г. Авершин, И.М. Петухов, Г.Л. Фисенко) отмечали влияние параметров сдвижения пород на удароопасность угольных пластов. По аналогии с этим автором сделано предположение о взаимосвязи между скоростью оседания земной поверхности и потенциальной выбросоопасностью калийно-магниевых пластов.

Ранее был разработан метод прогноза потенциально выбросоопасных зон по геологическим признакам, что позволило составить региональные прогнозные карты по всем отработываемым шахтным полям Верхнекамского месторождения [4]. Для анализа были приняты данные о сдвижении земной поверхности по 16 профильным линиям на шахтных полях Березниковских (БКПРУ-1, 2, 3) и Соликамских (СКПРУ-1, 2) калийных производственных рудоуправлениях (использованы данные Н.Ф. Аникина). Всего в банк данных включено 52 наблюдения за скоростью сдвижения земной поверхности над отработанными опасными и неопасными зонами.

Данные обрабатывали с помощью множественной линейной регрессии, дискриминантного и дисперсионного анализов. Вычислялись уравнения регрессии, оценки достоверности, воспроизводимости, значимости разделения и тесноты связей результатов наблюдений, а также строились регрессионные зависимости как в опасных, так и неопасных зонах. К рассмотрению и анализу принимались максимальные и средние за весь период наблюдений зафиксированные на каждом профиле скорости оседания поверхности. Кроме того, учитывались скорости на этих же профилях в наиболее характерной точке кривой оседания — точке смены знака деформирования земной поверхности от растяжения к сжатию.

Анализ графиков скоростей оседаний подработанной поверхности над опасными и неопасными зонами указывает на их значительное различие. В целях корректного доказательства разницы в скоростях оседаний над разными зонами и для возможности их сопоставительного анализа оценена значимость разделения скоростей оседаний подра-

ботанной поверхности на указанных участках. Значимость различий оценивалась с помощью дискриминантного анализа по критерию Фишера. Предварительно было определено, что все выборки максимальных и средних скоростей оседаний подчиняются нормальному закону распределения как в опасных, так и в неопасных зонах. Скорости в таких зонах значимо разделяются — расчетный коэффициент Фишера (отношение дисперсий) всегда больше табличного при 10%-ном уровне значимости. Все факторы, влияющие на процессы сдвигания подрабатываемых пород, были разделены на две группы: управляемые — горнотехнические и неуправляемые — горно-геологические.

К рассмотрению приняты следующие факторы: степень извлечения полезного ископаемого из недр (x_1 — пласты В; x_2 — АБ; x_3 — КрII, доли) и нагрузки целиков (x_4 — В; x_5 — АБ; x_6 — КрII, доли), число отрабатываемых пластов (x_7), их суммарная вынимаемая мощность (x_8 , м) и мощность междупластья (x_{13} , м). Из геологических параметров анализировались глубина (x_9 , м) и абсолютная глубина (x_{10} , м) залегания отрабатываемых пластов, мощность карналлитовой зоны (x_{11} , м), суммарная мощность карналлитовых пластов в водозащитной толще (ВЗТ) (x_{12} , м), абсолютный уровень залегания подземных вод (x_{14} , м). Интервалы варьирования горнотехнических и горно-геологических факторов представлены в табл. 1, а скоростей оседаний (мм/год) — в табл. 2.

Таблица 1

Фактор	Интервал варьирования	Фактор	Интервал варьирования
x_1	0,0–0,48	x_8	4,9–21,0
x_2	0,0–0,60	x_9	218–397
x_3	0,0–0,62	x_{10}	112,7–202,0
x_4	0,0–0,40	x_{11}	37,3–87,0
x_5	0,0–0,35	x_{12}	8,2–49,0
x_6	0,0–0,72	x_{13}	2,7–20,0
x_7	1–3	x_{14}	110–160

Таблица 2

Зона	$\dot{\eta}_{\text{ср}}$	$\dot{\eta}_{\text{max}}$
Неопасная	7–300	13–790
Опасная	37–657	56–1300

Функциональная зависимость скорости оседания подработанных пород от рассматриваемых параметров разделялась с помощью множественной линейной регрессии. Получены функциональные зависимости в виде линейного регрессионного полинома:

$$\dot{\eta} = ax_1 + bx_2 + cx_3 + \dots + kx_{14} + n,$$

где n — константа; a, b, c, k — параметры аппроксимации.

Все четыре функциональные зависимости средних и максимальных скоростей оседаний в опасных и неопасных зонах информативны и значимы: коэффициенты парной корреляции между теоретическим и фактическим распределениями составляют от 0,8 до 0,99, а коэффициент Фишера больше табличного. Для сравнения отметим, что единая зависимость, полученная по объединенным данным для опасных и неопасных зон, обладает значительно меньшей информативностью — коэффициент корреляции не более 0,5. Дисперсионный анализ уравнений регрессии позволил количественно оценить степень влияния на скорость оседаний каждого из принятых к рассмотрению факторов.

Получено, что в неопасных зонах максимальные ожидаемые и средние скорости определяются главным образом четырьмя параметрами, а в опасных — восемью. В неопасных зонах они зависят от степени извлечения карналлитового пласта (при его обработке доля вклада 52–67 %), степени нагружения целиков по пластам КрII (11 %), В (8–11 %), а также в малой доле от глубины залегания пластов (2–3 %), т.е. в основном от горнотехнических факторов. Необходимо отметить, что степень нагружения целиков — комплексный параметр, учитывающий природные факторы — прочность пород и глубину залегания отрабатываемых пластов, а также задаваемые геометрические размеры целиков.

В опасных зонах кроме горнотехнических факторов — степени извлечения пластов (15–24 %), степени нагружения целиков по всей свите отработываемых пластов (1–13 %), их числа и вынимаемых мощностей (9–12 %) — скорости оседания зависят в явном виде от геологических факторов — мощности подрабатываемой карналлитовой зоны (8–15 %), суммарной мощности подрабатываемых пластов только карналлитового состава (7,6 %), глубины залегания отработываемых пластов (5 %). Мощность всей водозащитной толщи, суммарная мощность подрабатываемых пластов каменной соли не оказывают существенного влияния на скорость оседания пород (менее 1 %). Очевидно, это одно из объяснений, почему произошло затопление рудника БКПРУ-3 при мощности ВЗТ около 130 м, тогда как на других шахтных полях горные работы велись без прорыва вышележащих вод при мощности ВЗТ 60 м. Следовательно, процессы сдвигания подрабатываемого массива в выбросоопасных зонах являются более многофакторными, зависящими в значительной степени от природных геологических условий, отклонения в которых в худшую для недропользователей сторону объясняют аномально высокие скорости оседания пород.

Адекватность полученных зависимостей проверена для условий, не включенных в обучающую выборку. В экзаменационную выборку включены условия аварийных участков на Третьем Березниковском; Втором, Первом (115-й блок) Соликамских рудниках, где отмечались высокие скорости оседания пород. При использовании зависимости для максимальных ожидаемых скоростей сдвижения подрабатываемых пород в опасных зонах их величины наиболее близки к фактическим, т.е. если бы даже не было аварийных ситуаций, обусловленных прорывом вод (БКПРУ-3), массового разрушения большого объема выработка (СКПРУ-2), на этих участках следовало ожидать высоких скоростей сдвижения ВЗТ. Так, на руднике БКПРУ-3 они могли быть равны 1281, СКПРУ-2 — 3386, СКПРУ-1 — 800 мм/год. По полученным зависимостям были построены прогнозные карты ожидаемых скоростей оседаний земной поверхности после ее подработки по всем шахтным полям Верхнекамского месторождения. Для примера укажем, что согласно прогнозу, произведенному в 1995 г. над 4-й западной панелью рудника БКПРУ-1, район прорыва надсоляных вод с последующим затоплением рудника в 2006 г., прогнозировались аномально высокие скорости оседаний для этого шахтного поля — до 300 мм/год [5].

Для разделения на два класса многомерного признакового пространства геологических параметров в подрабатываемой толще в опасных и неопасных зонах был применен дискриминантный анализ. Получены дискриминантные уравнения.

Вероятность правильной классификации по обучающей выборке 100%-ная неопасной и 91%-ная опасной зон. Значимость разделения выборок из обеих зон оценивалась по критерию Пирсона. За меру линейной связи между функцией и геологическими параметрами получен множественный коэффициент корреляции, равный 0,81 для сильвинитовых пластов и 0,94 для карналлитового, что указывает на высокую связь между ними. В целом по месторождению в опасных зонах отрабатываемые пласты залегают на больших глубинах, в среднем 322 и 300 м, мощность карналлитовой зоны 49 и 57 м, суммарная мощность пластов только карналлитового состава в подрабатываемой толще 23 и 29 м, мощность междупластий 8 и 11 м. Опасные зоны — это зоны, в которых происходили вторичные гипергенные процессы, сопровождавшиеся из-

менением состава пород и уменьшением их прочностных характеристик. Выбросоопасные зоны отличаются от неопасных по геологическим параметрам и распространены вверх по разрезу (по стратиграфии). Расчеты ожидаемых вероятных скоростей оседаний по единой зависимости дают заниженные значения в опасных зонах, скорости оседаний здесь определяются большим числом геологических факторов, чем в неопасных.

Аномально высокие скорости оседаний (просадок) подработанной земной поверхности в ряде случаев могут приводить к негативным последствиям. При разработке жидких и газообразных углеводородов возникают техногенные землетрясения, что особенно опасно в регионах с отсутствующей природной сейсмичностью (Поволжье, Предуралье, Западная Сибирь). Разработка угольных месторождений без разработки комплекса конструктивных мероприятий по охране поверхностных зданий, сооружений и природных объектов может привести к их разрушению. На калийных и соляных месторождениях расчеты параметров скоростей и величин оседаний без учета конкретных механических свойств (в рассматриваемом случае выбросоопасности) подрабатываемых пород вызывают катастрофические последствия в виде затопления подземных рудников (БКПРУ-1, 3).

Список литературы

1. *Авершин С.Г.* Сдвижение горных пород при подземных разработках. — М.: Углетехиздат, 1947. — 245 с.
2. *Сидоров В.А.* Возникновение опасных геодинамических событий в связи с разработкой месторождений нефти и газа// Разведка и охрана недр. — 1999. — № 5–6. — С. 43–48.
3. *Современная геодинамика и нефтегазоносность*// В.А. Сидоров, М.В. Багдасарова, С.В. Атанасян и др. — М.: Наука, 1989. — 200 с.
4. *Лаптев Б.В.* Предотвращение газодинамических явлений на калийных рудниках. — М.: Недра, 1994. — С. 142.
5. *Лаптев Б.В.* О взаимосвязи параметров сдвижения с выбросоопасностью пород. Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций: Материалы международного симпозиума. — Екатеринбург: УрО РАН, 1997. — С. 99–104.

laptevbv@mail.ru