УДК 519.24:553.632

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОПОСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ*

А. С. НИКОЛАЕВ,
старший научный сотрудник,
АО «ВНИИ Галургии»,
Санкт-Петербург, Россия,
geolog_speleo@mail.ru

Представлены исследования по оценке влияния особенностей геологического строения подрабатываемых горными работами водозащитной толщи и надсолевых отложений Верхнекамского месторождения калийных солей на их состояние. С использованием методов регрессивного анализа, включая множественную корреляцию и факторный анализ (метод главных компонентов), а также программного продукта STATISTICA выработано четыре наиболее значимых фактора влияния на разрушаемость водозащитной толщи.

По каждому из этих факторов показаны критериальные параметры и интерпретирована «ответственность». Выявленные закономерности и предложенные методические подходы позволяют перейти от качественной оценки надежности водозащитной толщи к ее количественным оценкам с учетом влияния геологических особенностей надсолевых отложений.

Ключевые слова: *месторождение калийных солей, водозащитная толща, подработка, геологическое строение, количественная оценка, моделирование, множественная регрессия, метод главных компонент.*

DOI: *http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.03*

Введение

Важнейшим условием обеспечения безопасного функционирования калийных рудников является сохранение целостности подрабатываемой горными породами водозащитной толщи (ВЗТ). Расчетную оценку геомеханического состояния ВЗТ по мере ее подработки выполняют на основе данных геологического изучения (геологоразведки) массива горных пород и математического моделирования методом конечных элементов подрабатываемого массива с учетом его неоднородности и наличия ослаблений [1–3]. Представленные ниже исследования и моделирование развития ситуации в ВЗТ проведены для условий разработки двух сближенных сильвинитовых пластов рудника СКРУ-3 и прирезаемой к нему части Половодовского участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВМКМС).

Результаты исследований и математического моделирования ВЗТ

По результатам математического моделирования ВЗТ с ее геологическими особенностями в строении рассчитаны критические значения оседания *V* (см) кровли пласта АБ, при которых образуются трещины на полную мощность ВЗТ. Расчет процесса деформирования горных пород ВЗТ и надсолевых отложений проводили на базе модифицированного программного комплекса DESTROCK PLANE [4]. Математическая модель учитывает все основные свойства деформирования горных пород: упругость, вязкость, пластичность, хрупкость, длительное разрушение. Всего в модели было принято 10 разновидностей пород: известняк, мергель, глина, песчаник, аргиллит-алевролит-песчаник, алевролит разрушенный, каменная соль, сильвинит, карналлитовая порода, гипс. Каждой разновидности присвоены различные деформационные и прочностные характеристики. При этом учтено, что породы могут быть сплошными, нарушенными трещинами, расслоенными по напластованию. В частности, массив горных пород отнесен к слоистой неоднородной среде, каждому слою которой приданы свои механические свойства и ориентированные природные ослабления, приведенные в геологических разрезах по скважинам. При расчетах принимали прочностные и деформационные свойства пород, которые определены по результатам лабораторных исследований керновых материалов в ОАО «Галургия».

Всего в пределах шахтного поля СКРУ-3 для определения физико-механических свойств пород было отобрано 1850 проб, но ни в одной скважине, пробуренной с поверхности, не были исследованы свойства пород по всему разрезу подрабатываемой толщи, а отдельные бессистемно отобранные пробы испытывали не по всем необходимым параметрам. Поэтому при построении модели пришлось ограничиться данными литолого-стратиграфического разреза по каждой скважине и усредненными физико-механическими данными, едиными для всех скважин независимо от полноты разреза.

Выемочные мощности определяли: по пласту АБ — на высоту 3,1 м независимо от его мощности, по пласту Красный II — на полную мощность.

Моделирование процесса разрушения ВЗТ проведено по данным 82 скважин; в каждом случае выделяли критическое значение оседания *V* (см) кровли пласта АБ, при котором происходило полное разрушение ВЗТ. При наблюдении в модели роста оседа-

* Исследования проведены под руководством докт. геол.-минерал. наук, проф. В. И. Раевского; теоретические основы и программная реализация геомеханических расчетов разработаны ведущим научным сотрудником, канд. техн. наук А. Г. Оловянным.

© Николаев А. С., 2016

Таблица 1. Параметры массива горных пород (м) и критические значения величины оседания *V* (см) кровли пласта АБ

Параметр	Значение			Среднеквадратичное отклонение
	среднее	минимум	максимум	
Мощность четвертичных отложений	8,31	0	25,3	5,9
Мощность пестроцветной толщи (ПЦТ)	8,15	0	74,3	16,06
Мощность терригенно-карбонатной толщи (ТКТ)	82,64	0	140,1	35,09
Мощность бессолевой части соляно-мергельной толщи ($СМТ_2$)	84,98	49,6	115,2	14,14
Мощность надсолевых отложений	184,09	91,8	268	35,97
Мощность соляно-мергельной толщи (СМТ)	109,7	70	153,3	17,88
Мощность ВЗТ	96,95	19	181,1	32,08
Мощность продуктивной толщи над пластом АБ ($ВЗТ_1$)	56,43	19	88,7	13,99
Мощность $ВЗТ_2$ — покровной каменной соли (ПКС)	15,81	0	24,3	5,75
Мощность $ВЗТ_3$ — переходной толщи $СМТ_1$	24,71	0	85,8	27,1
Глубина кровли пласта АБ	280,35	146,4	412,4	56,18
Мощность пласта Красный II	4,49	2	9,7	1,56
Мощность потолочины между кровлей пласта Красный II и подошвой пласта АБ	4,83	2,35	11,5	1,62
Мощность между кровлей пласта АБ и кровлей пласта Красный II	8,34	4,1	17,7	4,19
Глубина кровли пласта Красный II	288,73	155,7	418,3	54,74
Суммарная мощность карналлитовых слоев в ВЗТ	23,67	0	44,05	11,26
Число карналлитовых слоев в ВЗТ, ед.	12,74	0	25	5,75
Суммарная мощность соляных слоев в ВЗТ	60,58	11	110,1	19,45
Число соляных прослоев в ВЗТ, ед.	19,11	7	31	4,99
Критическое значение величины оседания *V* кровли пласта АБ	301,95	65,52	606,28	138,35

ний подработанной толщи было отмечено, что разрушения начинаются в первую очередь в карналлитовых и глинистых пластах. В каменной соли скорость разрушения выше в пластах с большей мощностью, а маломощные пласты быстрее пронизываются сквозными трещинами. Также отмечено, что конфигурация распространения трещин зависит от строения толщи покрывающих пород.

На основе визуальных наблюдений было выбрано несколько параметров массива горных пород, от которых эмпирически зависит процесс разрушения ВЗТ при ее подработке, и по ним определено критическое значение величины оседания *V* кровли пласта АБ, при котором происходило полное разрушение ВЗТ (**табл. 1**).

При обработке данных разрезов геологоразведочных скважин и оценке их влияния на основной показатель деформации подрабатываемой толщи от кровли пласта АБ до земной поверхности использовали методы регрессионного и факторного анализов [5–13]. Для всех исходных данных выполнена проверка на нормальность распределений, предусмотренная программой STATISTICA [14, 15]. Для оценки зависимости величины оседания кровли пласта АБ (верхнего) при подработке массива ВЗТ от параметров массива горных пород рассчитаны значения коэффициентов корреляции, характеризующих тесноту связей параметров, приведенных в табл. 1, и значений оседаний *V* (**табл. 2**).

Корреляционные связи не ограничиваются двумя признаками — результативный признак зависит от нескольких факторов, в частности особенностей геологического строения и представлений о деформации слоистого массива пород при его подработке. Количественно оценить влияние различных факторов на результат, определить форму и тесноту связи между результативным и факторным признаками возможно методами множественной корреляции. Задача сводится к нахождению аналитического выражения связи. Параметры уравнения множественной регрессии рассчитывают методом наименьших квадратов. Прежде чем найти эти параметры, анализируют парные коэффициенты корреляции, используя процедуру стандартизации переменных.

После того как получено уравнение множественной регрессии, измеряют тесноту связи между результативными и факторными признаками, рассчитывают совокупный коэффициент детерминации R^2 и совокупный коэффициент множественной корреляции R, который представляет собой корень квадратный из совокупного коэффициента детерминации R^2. Пределы его изменения — $0 \le R \le 1$. Чем ближе его значение к 1, тем точнее уравнение множественной линейной регрессии отражает реальную связь. Малое значение R можно объяснить тем, что в уравнении множественной корреляции не включены существенно влияющие факторы, либо линейная форма зависимости не отражает реальной взаимосвязи признаков. Все вышеизложенное реализовано с помощью программы STATISTICA.

Значение совокупного коэффициента детерминации R_2, определенное по совокупности данных 82 скважин, составляет 0,569, соответственно коэффициент множественной корреляции R = 0,754. Среднеквадратическая ошибка определения значений оседаний V по линейному уравнению регрессии составляет 93,15 см, а значение свободного члена уравнения — 273,74 м (среднеквадратическое отклонение 66,95 м). Уравнение регрессии имеет следующий вид:

V = –273,74 + 2,155 (глубина кровли пласта Красный II) + 4,901 (число карналлитовых слоев в ВЗТ) – 3,765 м (мощность покровной камерной соли — ПКС) – 0,597 м (мощность терригенно-карбонатной толщи — ТКТ), см.

Результаты расчетов показали, что значения разрушающих проседаний V (см) в основном ($r \geq 0,5$) определяются следующими геологическими особенностями: глубиной залегания пластов KpII (r = 0,715) и АБ (r = 0,711); суммарной толщиной слоев каменной соли ВЗТ (r = 0,639); толщиной ВЗТ (r = 0,632); толщиной переходной пачки $СМТ_1$ (r = 0,551); толщиной надсолевых отложений (r = 0,541); числом слоев каменной соли (r = 0,532); толщиной ТКТ (r = 0,504); толщиной СМТ (r = 0,495). При этом из значений коэффициентов детерминации (R^2 = 0,569) и множественной корреляции (R = 0,754) следует, что основными определяющими особенностями являются глубина залегания пластов Красный II и АБ, число слоев карналлита, мощности ПКС и ТКТ.

Для обнаружения скрытых общих факторов, объясняющих связи между наблюдаемыми параметрами, выполнен факторный анализ методом главных компонент [16–21].

В программе STATISTICA этот метод позволяет выбрать число наиболее значимых факторов с помощью графического критерия каменистой осыпи. Для этого вычисляют собственные значения факторов (**табл. 3**) и затем отстраивают линейный график зависимости собственных значений факторов от их номера (см. **рисунок**), а также вычисляют и оформляют факторные нагрузки в табличном виде (**табл. 4**).

Ниже представлена интерпретация полученных вычислений (**табл. 5**).

Выводы и рекомендации

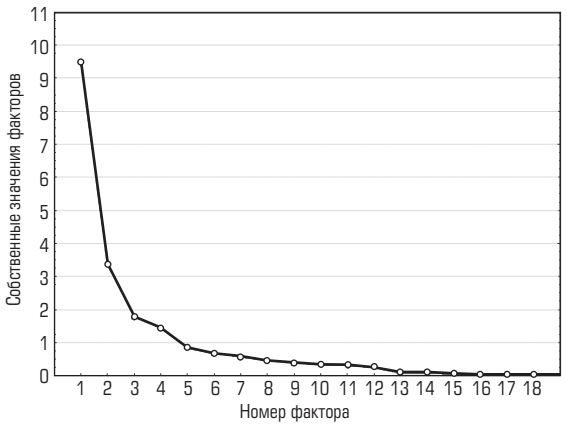
Впервые осуществлена попытка оценить влияние особенностей геологического строения массива горных пород на состояние подрабатываемых соляными рудниками водозащитной толщи и надсолевых отложений. С этой целью использованы методы регрессионного анализа, включая множественную корреляцию и факторный анализ (метод главных компонент). Количественное выражение степени опасности подработки определяется величиной оседания V (см) кровли верхнего разрабатываемого пласта, в результате которого происходит нарушение (разрушение) ВЗТ и возникает угроза проникновения в рудник надсоляных вод.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции параметров горного массива (см. табл. 1) и оседаний *V*

Параметры	Коэффициент корреляции
Глубина кровли пласта Красный II	0,71
Глубина кровли пласта АБ	0,71
Суммарная мощность соляных слоев в ВЗТ	0,64
Мощность ВЗТ	0,63
Мощность $ВЗТ_3$ — переходной толщи $СМТ_1$	0,55
Мощность надсолевых отложений	0,54
Число соляных прослоев в ВЗТ	0,53
Мощность терригенно-карбонатной толщи (ТКТ)	0,50
Мощность соляно-мергельной толщи (СМТ)	0,49
Число карналлитовых слоев в ВЗТ	0,45
Мощность пестроцветной толщи (ПЦТ)	0,45
Мощность $ВЗТ_2$ — покровной каменной соли (ПКС)	0,36
Суммарная мощность карналлитовых слоев в ВЗТ	0,34
Мощность продуктивной толщи над пластом АБ ($ВЗТ_1$)	0,24
Мощность четвертичных отложений	0,11
Мощность между кровлей пласта АБ и кровлей пласта Красный II	–0,29
Мощность потолочины между кровлей пласта Красный II и подошвой пласта АБ	–0,30
Мощность бессолевой части соляно-мергельной толщи ($СМТ_2$)	–0,43
Мощность пласта Красный II	–0,44

Таблица 3. Собственные значения выбранных четырех значимых факторов

Номер фактора	Собственное значение	Общая дисперсия, %	Накопленное собственное значение	Накопленная общая дисперсия, %
1	9,494599	47,47300	9,49460	47,47300
2	3,378275	16,89138	12,87287	64,36437
3	1,772613	8,86307	14,64549	73,22744
4	1,438846	7,19423	16,08433	80,42167



Линейная зависимость собственных значений факторов 1–4 (см. табл. 3) от их номера

Таблица 4. Факторные нагрузки, вычисленные методом главных компонент (вращение: нормализованный варимакс), м

Параметр	Факторы нагрузки			
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Мощность $ВЗТ_3$ — переходной толщи $СМТ_1$	0,393182	0,031196	0,099793	**0,899085**
Мощность $ВЗТ_2$ — покровной каменной соли (ПКС)	0,553310	0,427127	0,379186	0,042106
Мощность продуктивной толщи над пластом АБ ($ВЗТ_1$)	–0,230148	**0,836716**	0,050242	–0,019645
Мощность ВЗТ	0,330847	0,467894	0,174139	**0,758490**
Мощность четвертичных отложений	–0,082198	0,315819	–0,571420	0,332627
Мощность пестроцветной толщи (ПЦТ)	–0,053941	–0,166333	0,555914	0,564859
Мощность терригенно–карбонатной толщи (ТКТ)	0,337832	0,055166	**0,811031**	0,258273
Мощность бессолевой части соляно-мергельной толщи ($СМТ_2$)	0,007376	0,017722	–0,167805	**–0,854019**
Мощность надсолевых отложений	0,294977	0,038289	**0,880079**	0,223235
Глубина кровли пласта АБ	0,372477	0,294097	0,646196	0,579243
Мощность пласта Красный II	**–0,760608**	–0,122033	–0,295749	–0,229682
Мощность потолочины между кровлей пласта Красный II и подошвой пласта АБ	**–0,833683**	0,206292	–0,181289	–0,202316
Мощность между кровлей пласта АБ и кровлей пласта Красный II	**–0,865326**	0,220000	–0,245406	–0,210271
Суммарная мощность карналлитовых слоев в ВЗТ	–0,116837	**0,876889**	–0,020134	0,074457
Число карналлитовых слоев в ВЗТ	0,124990	**0,861274**	–0,046476	0,212208
Суммарная мощность соляных слоев в ВЗТ	0,406453	0,412104	0,241200	**0,713067**
Число соляных слоев в ВЗТ	0,339184	0,535420	0,005762	0,572236
Глубина кровли пласта Красный II	0,338468	0,312945	0,650736	0,583804
Мощность соляно-мергельной толщи (СМТ)	0,601684	0,061290	0,018535	0,687186
Критическое значение величины оседания *V* (см) кровли пласта АБ	0,176248	0,378333	0,406529	0,517702

Примечание. Полужирным шрифтом выделены нагрузки более 0,7.

Таблица 5. Интерпретация факторных нагрузок

Фактор	Параметр	Интерпретация
Фактор 1	Мощность между кровлей пластов АБ и Красный II Мощность потолочины между кровлей пласта Красный II и подошвой пласта АБ Мощность пласта Красный II	Фактор 1 отвечает за параметры системы разработки (главные — сближенность пластов и вынимаемая мощность)
Фактор 2	Суммарная мощность карналлитовых слоев в ВЗТ Число карналлитовых слоев в ВЗТ Мощность продуктивной толщи над пластом АБ ($ВЗТ_1$)	Фактор 2 отвечает за «карналлитовость» разреза, которая влияет на мощность $ВЗТ_1$
Фактор 3	Мощность надсолевых отложений Мощность ТКТ	Фактор 3 отвечает за мощность толщи пород над ВЗТ, которая в основном определяется мощностью ТКТ
Фактор 4	Мощность $ВЗТ_3$ — переходной толщи $СМТ_1$ Мощность ВЗТ Суммарная мощность соляных прослоев в ВЗТ Мощность бессолевой части соляно-мергельной толщи ($СМТ_2$)	Фактор 4 отвечает за наличие ВЗТ3 и, как следствие, за суммарную мощность всей ВЗТ, определяемую суммарной мощностью соляных прослоев в ВЗТ

Проведенными исследованиями установлено, что слои каменной соли ВЗТ — не единственный и не главный фактор, определяющий интенсивность и величину деформаций подрабатываемой толщи соленосных и надсоляных пород.

На основе значений парных коэффициентов корреляции показано, что величины разрушающих *V* (см) в основном ($r \geq 0,5$) определяются: глубиной залегания разрабатываемых пластов; суммарной мощностью слоев каменной соли ВЗТ; мощностью ВЗТ; мощностью переходной соляно-мергельной пачки ($СМТ_1$); мощностью надсолевых отложений; числом слоев каменной соли в ВЗТ; мощностью терригенно-карбонатной толщи (ТКТ), мощностью СМТ. При этом уравнение множественной регрессии показало, что определяющими являются: глубина залегания разрабатываемых пластов, число слоев карналлита, мощности покровной каменной соли (ПКС) и ТКТ.

В программе STATISTICA методом главных компонент выбрано четыре наиболее значимых фактора влияния на разрушение ВЗТ: параметры системы разработки, а именно: сближенность разрабатываемых пластов и вынимаемая мощность; наличие мощных карналлитовых слоев, которые определяют мощность $ВЗТ_1$; мощность ТКТ, которая определяет толщу бессолевых пород над ВЗТ; наличие $ВЗТ_3$ как части всей ВЗТ, определяемой суммарной мощностью в ней соляных прослоев.

Выявленные закономерности позволяют отойти от качественного определения надежности ВЗТ и перейти к ее количественным оценкам с учетом влияния геологических особенностей надсолевых отложений. Для подтверждения и апробации предложенных методов математического моделирования необходимо продолжить аналогичные исследования на других шахтных полях с предварительным получением данных о физико-механических свойствах пород по всему разрезу, а также провести заверочные работы.

Библиографический список

1. *Оловянный А. Г.* Механика горных пород. Моделирование разрушений. — СПб. : КОСТА, 2012. — 280 с.
2. *Черданцев Н. В., Преслер В. Т.* Моделирование геомеханического состояния анизотропного по прочности неоднородного массива горных пород // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. № 3. С. 15–22.
3. *Фи Х. Т., Нгуен Н. М., Строкова Л. А.* Оценка и прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханой (Вьетнам) // Инженерная геология. 2012. № 2. С. 52–59.
4. *Оловянный А. Г., Чанцев В. П.* Программный комплекс для математического моделирования трещиноватых разрушающихся массивов горных пород (Destrock Plane) / Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН. 2010. URL: http://hge.spbu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=3303&Itemid=163 (дата обращения: 17.03.2016).
5. *Дэвис Дж. С.* Статистический анализ данных в геологии / под ред. Д. А. Родионова. — М. : Недра, 1990. Кн. 2. — 427 с.
6. *Поротов Г. С.* Математические методы моделирования в геологии. — СПб. : Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2006. — 223 с.
7. *Каждан А. Б., Гуськов О. И.* Математические методы в геологии. — М. : Недра, 1990. — 251 с.
8. *Кнoринг Л. Д., Деч В. Н.* Геологу о математике. Советы по практическому применению. — Л. : Недра, 1989. — 208 с.
9. *Grunsky E. C.* Statistical analysis in the geosciences // Geoinformatics. Vol. 2. URL: http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C01/E6-64-03.pdf (дата обращения: 17.03.2016).
10. *Jöreskog K. G., Klovan J. E., Reyment R. A.* Geological Factor Analysis. — Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. — 178 p.
11. *Kaiser Mark S.* Statistical analysis of spatial count data // Environmetrics. URL: http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C02/E4-26-02-03.pdf (дата обращения: 17.03.2016).
12. *Nollau V.* Regression analysis // Probability and statistics. Vol. III. URL: http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C02/E6-02-05-02.pdf (дата обращения: 17.03.2016).
13. *Nollau V.* Correlation analysis // Probability and statistics. Vol. III. URL: http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C02/E6-02-05-01.pdf (дата обращения: 17.03.2016).
14. *Михалевич И. М., Примина С. П.* Применение математических методов при анализе геологической информации (с использованием компьютерных технологий: Statistica). Ч. 3. — Иркутск : ИГУ, 2006. — 115 с.
15. *Боровиков В. П., Боровиков И. П.* STATISTICA — статистический анализ и обработка данных в среде Windows. — М. : Филинъ, 1998. — 593 с.
16. *Никифоров И. А.* Статистический анализ геологических данных. — Оренбург : ОГУ, 2010. — 170 с.
17. *Козлов Е. Н.* Использование метода главных компонент для изучения процессов полиметасоматоза в контактах карбонатитовых комплексов Кольского полуострова // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 245–254.
18. Метод главных компонент. URL: http://www.myshared.ru/slide/764278/# (дата обращения: 17.03.2016).
19. *Голынская Ф. А., Киселев М. Г.* Применение факторного анализа при моделировании процесса самовозгорания углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 5. С. 38–40.
20. *Белонин М. Д., Голубева В. А., Скублов Г. Т.* Факторный анализ в геологии. — М. : Недра, 1982. — 269 с.
21. *Бахтин А. И., Низамутдинов Н. М., Хасанова Н. М., Нуриева Е. М.* Факторный анализ в геологии. — Казань : Казанский государственный университет, 2007. — 32 с. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 4, pp. 15–20
DOI: http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.03

Statistical analysis comparing the results of the geomechanical calculations and geological data

Information about author
A. S. Nikolaev[1], Senior Researcher, geolog_speleo@mail.ru

[1] VNII Galurgy Stock Co., St. Petersburg, Russia

Abstract
For the first time it is made an attempt to assess the impact of features of the geological structure of the waterproof formation and suprasalt sediments on their state during undermining in the conditions of the Upper Kama deposit of potassium and magnesium salts. To assess the role of geological features in the destruction of the massif there were used the methods of the regression analysis, including multiple correlation and principal components method.
The quantitative expression of the degree of danger of undermining is determined by sedimentation of the roof of the upper seam V(cm) which results in the destruction of waterproof formation and there is a risk of penetration of suprasalt water into the mine.
The studies did not confirm the influence of the "anomalous" structure of waterproof formation on the undermined rock massif, except for completeness of the waterproof formation cut. It was found that the behavior of deformable rock mass is definitely influenced by suprasalt rock, that layers of rock salt – is not the only or the main factor determining the intensity and magnitude of the deformations of undermining formation of saliferous and suprasalt rock.
The results showed that, based on the pair values of the correlation coefficients, it is may be concluded that the values of destroying V(cm) mainly determined by the following conditions: occurrence depth of seams being mined, total thickness of layers of rock salt of waterproof formation, occurrence depth of waterproof formation, depth of transition member of salt- marlaceous formation1, thickness of suprasalt sediments, number of rock salt layers in a waterproof formation, thickness of terrigenous-carbonate and salt-marlaceous formations.
The equation of multiple regression showed that the following conditions are defined: the occurrence depth of the seams being mined, the number of layers of carnallite, thickness of covering rock salt and terrigenous-carbonate formation.
There are identified four factors influencing the destruction of the waterproof formation; mining thickness and closeness of seams; the availability of thick carnallite layers in waterproof formation, thickness of terrigenous-carbonate formation; the presence of transition member ant total thickness of salt layers in the waterproof formation.
The revealed regularities allow to depart from the qualitative determination of the reliability of the waterproof formation and move it to the quantitative estimates, taking into account the influence of the geological features of the suprasalt sediments.
The studies were conducted under the leadership of chief researcher, doctor of geological-mineralogical sciences, Professor V. I. Raevskiy, theoretical foundations and software implementation of the geomechanical calculations were developed by a leading researcher, Candidate of Engineering sciences A. G. Olovyannyi.
Keywords: Deposit of potash salt, waterblocking rock mass, undermining, geologic structure, quantitative estimate, simulating, multiple regression, principal components method.

References

1. Olovyannyy A. G. *Mekhanika gornykh porod. Modelirovanie razrusheniy* (Rock mechanics. Simulation of destruction). Saint Petersburg : KOSTA, 2012. 280 p.

2. Cherdantsev N. V., Presler V. T. Modelirovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya anizotropnogo po prochnosti neodnorodnogo massiva gornykh porod (Simulation of geomechanical state of inhomogeneous rock massif which is anisotropic in its strength). *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Kuzbass State Technical University.* 2011. No. 3. pp. 15–22.
3. Fi Kh. T., Nguen N. M., Strokova L. A. Otsenka i prognoz osedaniya zemnoy povekhnosti v rezultate izvlecheniya podzemnykh vod v gorode Khanoy (Vetnam) (Assessment and forecast of earth surface settlement due to groundwater extraction in Hanoi (Vietnam)). *Inzhenernaya Geologiya = Engineering Geology.* 2012. No. 2. pp. 52–59.
4. Olovyannyy A. G., Chantsev V. P. *Programmnyy kompleks dlya matematicheskogo modelirovaniya treshchinovatykh razrushayushchikhsya massivov gornykh porod (Destrock Plane)* (The software package for mathematical simulation of fractured destroying rock massifs (Destrock Plane)). Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS. 2010. Available at: http://hge.spbu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=3303&Itemid=163 (accessed : March 17, 2016).
5. John C. Davis. *Statisticheskiy analiz dannykh v geologii* (Statistics and data analysis in geology). Edited by D. A. Rodionov. Moscow : Nedra, 1990. Book 2. 427 p.
6. Porotov G. S. *Matematicheskie metody modelirovaniya v geologii* (Mathematical methods of simulation in geology). Saint Petersburg : Saint Petersburg State Mining Institute, 2006. 223 p.
7. Kazhdan A. B., Guskov O. I. *Matematicheskie metody v geologii* (Mathematical methods in geology: Textbook for High Schools). Moscow : Nedra, 1990. 251 p.
8. Knoring L. D., Dech V. N. *Geologu o matematike. Sovety po prakticheskomu primeneniyu* (To tell geologist about mathematics. Practical application advises). Leningrad : Nedra, 1989. 208 p.
9. Grunsky E. C. Statistical analysis in the geosciences. Geoinformatics. Vol. II. Available at: http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C01/E6-64-03.pdf (accessed : March 17, 2016).
10. Jöreskog K. G., Klovan J. E., Reytment R. A. Geological Factor Analysis. Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. 178 p.
11. Kaiser Mark S. Statistical analysis of spatial count data. Environmetrics. Available at: http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C02/E4-26-02-03.pdf (accessed : March 17, 2016).
12. Nollau V. Regression analysis. Probability and statistics. Vol. 3. Available at: http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C02/E6-02-05-02.pdf (accessed : March 17, 2016).
13. Nollau V. Correlation analysis. Probability and statistics. Vol. 3. Available at: http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C02/E6-02-05-01.pdf (accessed : March 17, 2016).
14. Mikhalevich I. M., Primina S. P. *Primenenie matematicheskikh metodov pri analize geologicheskoy informatsii (s ispolzovaniem kompyuternykh tekhnologiy: Statistica). Chast 3* (Use of mathematical methods for geological information analysis (using computer technologies: Statistica). Part 3). Irkutsk : Irkutsk State University, 2006. 115 p.
15. Borovikov V. P., Borovikov I. P. *STATISTICA – Statisticheskiy analiz i obrabotka dannykh v srede Windows* (STATISTICA – Statistical analysis and data processing in Windows). Moscow : Filin, 1998. 593 p.
16. Nikiforov I. A. *Statisticheskiy analiz geologicheskikh dannykh* (Statistical analysis of geological data). Orenburg : Orenburg State University, 2010. 170 p.
17. Kozlov E. N. Ispolzovanie metoda glavnykh component dlya izucheniya protsessov polimetasomatoza v kontaktakh karbonatitovykh kompleksov Kolskogo poluostrova (Using the principal components method to study the polymetasomatosis processes in the contacts of carbonatite complexes at Kola peninsula). *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Murmansk State Technical University.* 2015. Vol. 18, No. 2. pp. 245–254.
18. *Metod glavnykh component* (Principal components method). Available at: http://www.myshared.ru/slide/764278/# (accessed : March 17, 2016). (in Russian)
19. Golynskaya F. A., Kiselev M. G. Primenenie faktornogo analiza pri modelirovanii protsessa samovozgoraniya ugley (Use of factorial analysis for simulation of coal self-ignition process). *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2009. No. 5. pp. 38–40.
20. Belonin M. D., Golubeva V. A., Skublov G. T. *Faktornyy analiz v geologii* (Factorial analysis in geology). Moscow : Nedra, 1982. 269 p.
21. Bakhtin A. I., Nizamutdinov N. M., Khasanova N. M., Nurieva E. M. *Faktornyy analiz v geologii* (Factorial analysis in geology). Kazan : Kazan State University, 2007. 32 p.

УДК 625.42:622.838

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПРОХОДКИ СТАНЦИОННЫХ ТОННЕЛЕЙ НА ВЕЛИЧИНУ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

В. П. ХУЦКИЙ,
зав. сектором,
канд. техн. наук,
АО «ВНИИ Галургии»,
Санкт-Петербург, Россия,
hucky@galurgy.sp.ru

В статье представлены результаты исследований, полученных на основании данных натурных наблюдений, влияния скорости проходки станционных тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге на деформации земной поверхности. Результаты исследований показали, что деформации земной поверхности в основном зависят от горно-геологических условий заложения тоннелей и технологических факторов проходки. Скорость проходки станционных тоннелей не оказывает существенного влияния на деформации земной поверхности и, как следствие, на безопасность подработки зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния горнопроходческих работ.

Ключевые слова: *станционные тоннели, скорость проходки тоннелей, станции метрополитена, скорость нарастания оседания, деформации земной поверхности.*

DOI: *http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.04*

Введение

Как показывают имеющиеся данные натурных измерений оседания земной поверхности при сооружении станционных тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге, процесс сдвижения поверхности растянут во времени и имеет неравномерный характер [1]. Установлено, что процесс развития оседания земной по-

© Хуцкий В. П., 2016