

А.И. Быкадоров, П.М. Ларичкин, С.В. Свирко, О.А. Ягунова
АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЗАТОПЛЕНИЯ
КОНСЕРВИРУЕМЫХ ШАХТ КУЗБАССА

Основными способами консервации (ликвидации) шахт Кузбасса являются «мокрый», проводимый путем полного затопления до отметок самоизлива, и комбинированный, когда уровень воды в ликвидируемой шахте поддерживается на определенной отметке, определяемой, в основном, условиями исключения перетоков на соседние действующие шахты. Рассмотрены 15 шахт Кузбасса, на которых велись регулярные замеры уровня воды от начала их ликвидации. Анализировались периоды активного процесса затопления (от начала и до момента, когда уровень затопления достигал поверхностных водоносных слоев и процесс затопления принимал затяжной характер, или до проектных отметок, с которых начиналось принудительное водопонижение на затопливаемой шахте). По результатам проведенного анализа установлено, что консервация шахт Кузбасса «мокрым» и комбинированным способами сопровождается большими колебаниями скоростей затопления, анализ дисперсии которых можно произвести с использованием методов теории случайных функций. Выделены группы консервируемых шахт по характеру скорости затопления. Приведены метод и результаты анализа дисперсии скорости затопления. По всей совокупности выполненных наблюдений предложена зависимость для прогнозной оценки скорости затопления новых консервируемых шахт, имеющая экспоненциальный характер и определены ее параметры.

Ключевые слова: шахта, консервация, скорость затопления, динамика процесса затопления, корреляционная функция, анализ.

Каждая консервируемая способом затопления шахта имеет свою глубину и продолжительность активного процесса затопления. Сопоставление рассматриваемого процесса по всем шахтам может быть произведено в нормализованных величинах, то есть глубина h_n и время t_n активного процесса затопления по каждой шахте приводятся к интервалу $[0; 1]$ по формулам:

$$h_n = h_i/H; t_n = t_i/T;$$

где h_i – текущая глубина от горизонта затопления шахты до уровня окончания активной стадии процесса затопления, м; H – общая глубина затопления, м; t_i – текущее время затопления, мес; T – общее время активной стадии затопления шахты, мес.

Анализом результатов многолетних наблюдений за изменением уровней затопления шахт во времени установлено, что активный процесс затопления в среднем по всем шахтам (рис. 1) описывается компактной зависимостью:

$$h_n = 2t_n - t_n^2 \tag{1}$$

Выражение (1) можно рассматривать как типовую кривую активного процесса затопления шахт Кузбасса в нормализованных величинах глубины и времени.

На всех ликвидируемых шахтах наблюдаются большие колебания скорости их затопления.

Статистические характеристики скорости затопления приведены в табл. 1. Наибольшая величина максимальных скоростей затопления наблюдалась на

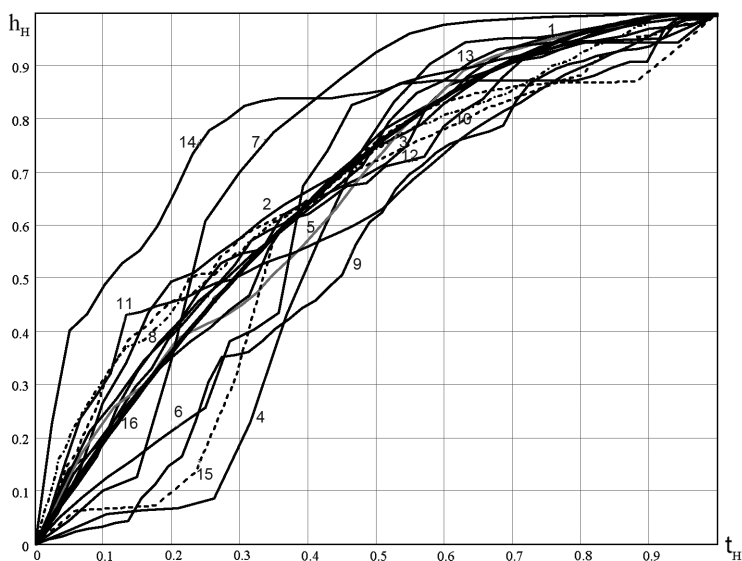


Рис. 1. Развитие процесса затопления во времени шахт Кузбасса: 1 – Северная, 2 – Южная, 3 – Лапичевская, 4 – Бунгурская, 5 – Бутовская, 6 – Волкова, 7 – Ягуновская, 8 – Анжерская, 9 – Красный Углекоп, 10 – Димитрова, 11 – Кольчугинская, 12 – Красный Кузбасс, 13 – Бирюлинская, 14 – Нагорная, 15 – Северный Маганак, 16 – общая средняя

Таблица 1

Статистические характеристики скорости затопления консервируемых шахт Кузбасса

Шахта	Статистические характеристики скорости затопления				
	Максимум, м/мес	Средняя, м/мес	Дисперсия, (м/мес) ²	Стандартное отклонение, м/мес	Коэффициент корреляции
1. Северная	23,0	7,48	31,39	5,60	-0,87
2. Южная	30,3	7,85	41,17	6,87	-0,78
3. Лапичевская	25,5	8,05	43,83	6,62	-0,76
4. Бунгурская	22,5	5,56	46,79	6,84	-0,32
5. Бутовская	15,0	5,28	14,45	3,80	-0,81
6. Волкова	53,0	7,69	108,08	10,40	-0,40
7. Ягуновская	61,0	11,06	252,60	15,89	-0,60
8. Анжерская	16,0	2,76	6,40	2,53	-0,69
9. Красный Углекоп	12,9	3,39	8,86	2,98	-0,24
10. Димитрова	14,0	3,03	7,69	2,77	-0,65
11. ш/у Кольчугинское	23,4	4,61	22,12	4,70	-0,50
12. Красный Кузбасс	9,3	3,05	5,22	2,29	-0,65
13. Бирюлинская	17,8	6,74	24,78	4,98	-0,83
14. Нагорная	45,0	4,98	82,19	9,07	-0,54
15. Северный Маганак	26,0	5,63	42,49	6,52	-0,26

шахтах Ягуновская, Волкова, Нагорная. По характеру изменения скорости затопления во времени затапливаемые шахты можно разделить на 4 группы.

К первой группе отнесены шахты, на которых процесс затопления начинается с максимальных скоростей (шахты Бирюлинская и Нагорная) или они достигаются в течение небольшого времени с момента начала затопления (шахты Южная и Анжерская). Далее скорости затопления быстро снижаются и в дальнейшем приобретают медленно затухающий колебательный характер (рис. 2, а).

Ко второй группе относятся шахты с большой продолжительностью нарастания скорости затопления до максимальных значений с последующим полным затоплением с малой скоростью (рис. 2, б; шахты Северный Маганак, Бунгурская, Волкова, Ягуновская). На этих шахтах пики максимальных скоростей затопления приходятся на первые весенние паводки от начала ликвидации. В этот период произошло основное затопление шахт: от 43% (ш. Волкова) до 57% (ш. Ягуновская).

К третьей группе относятся шахты со значительной продолжительностью (от 7 до 12 месяцев) достижения максимальных скоростей затопления и большим их колебанием на всем периоде затопления (рис. 2, в). Максимальные пики скорости на этих шахтах приурочены к весенним паводкам (шахты Красный Углекоп, Димитрова).

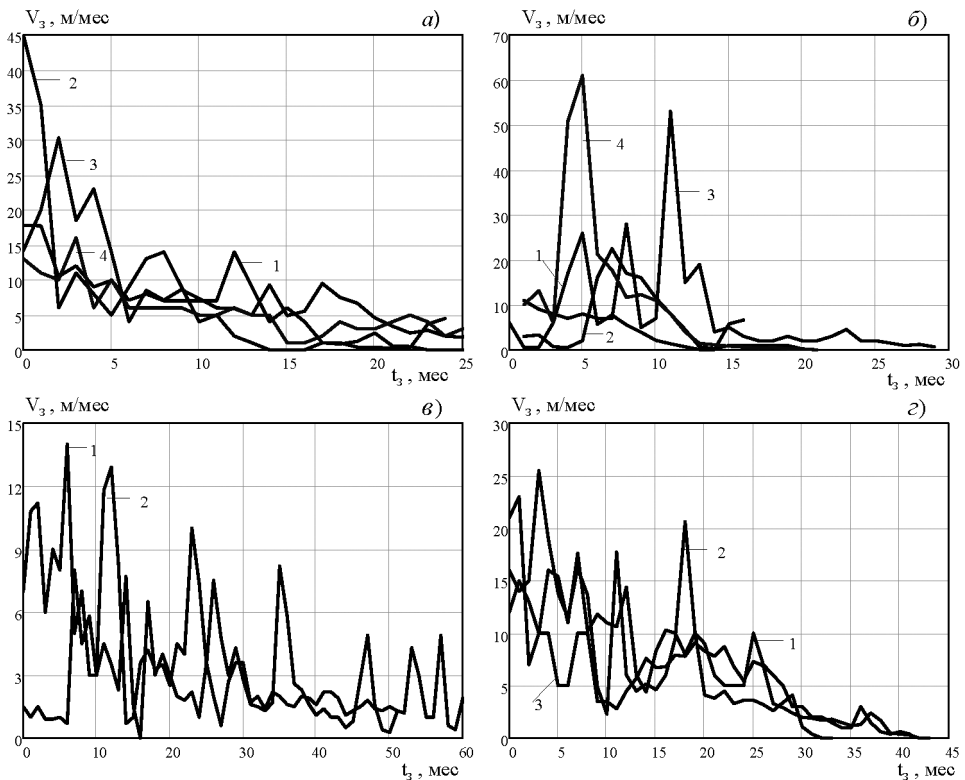


Рис. 2. Группировка шахт по характеру изменения скорости затопления: а) 1 – Нагорная, 2 – Бирюлинская, 3 – Южная, 4 – Анжерская; б) 1 – Северный Маганак, 2 – Бунгурская, 3 – Волкова, 4 – Ягуновская; в) 1 – Димитрова, 2 – Красный Углекоп; г) 1 – Северная, 2 – Лапичевская, 3 – Бутовская

К четвертой группе относятся шахты с небольшим периодом нарастания скорости затопления до максимальных значений и с медленным затуханием процесса затопления (рис. 2, г). Время нарастания скорости затопления обусловлены небольшим периодом зимних месяцев до первого весеннего паводка (шахты Северная, Лапичевская, Бутовская).

Процессы затопления шахты Красный Кузбасс и ш/у Кольчугинское трудно отнести к какой либо группе. При затоплении ш/у Кольчугинское (рис. 3, а) наблюдались большие пики скорости затопления в апреле и сентябре 2001 г. С марта по сентябрь шахта была затоплена на 44%. В дальнейшем затопление происходило с колебаниями скорости относительно средней в 2,5 м/мес. Затопление шахты Красный Кузбасс происходило с небольшим общим снижением скорости во времени и с выделяющимися пиками в паводковые периоды.

Приведенный в табл. 1. коэффициент корреляции характеризует линейную зависимость скорости от времени затопления. Однако снижение скорости (V_3) во времени (t) активного процесса затопления шахт носит экспоненциальный характер (затухающий временной тренд). Пример приведен на рис. 3, б.

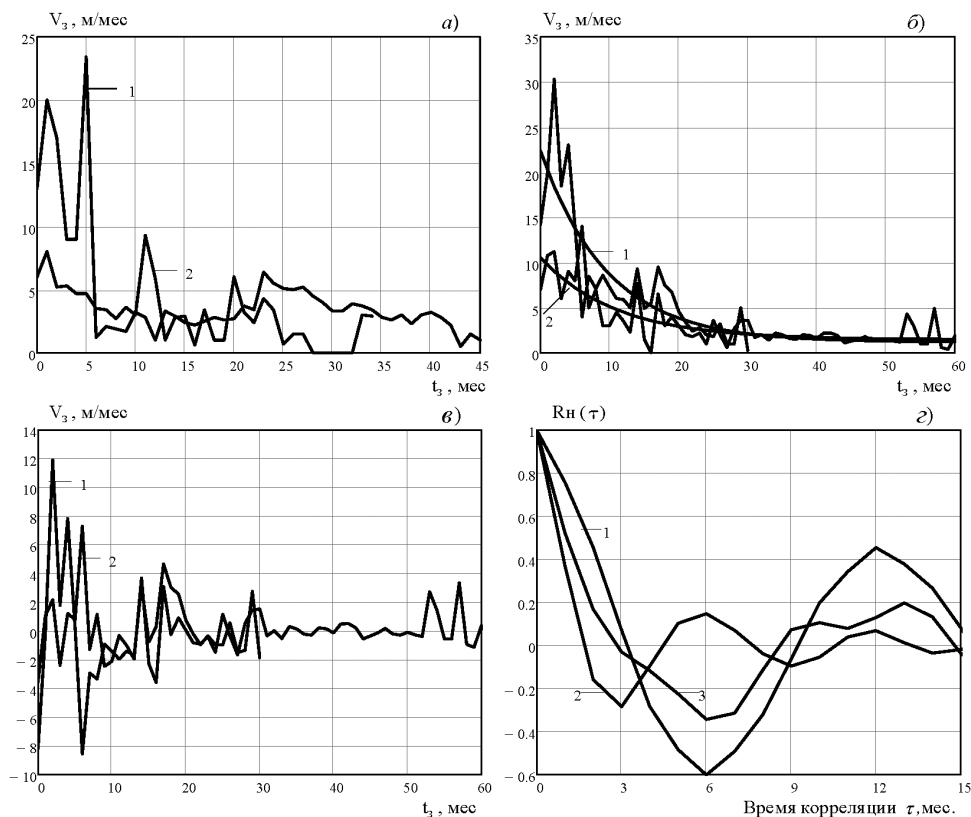


Рис. 3. Динамика скорости затопления консервируемых шахт Кузбасса: а) скорости затопления 1 – ш/у Кольчугинское, 2 – шахты Красный Кузбасс; б) пример выделения временного тренда скорости затопления, 1 – Южная, 2 – Димитрова; в) колебания скорости затопления после устранения временного тренда, 1 – Южная, 2 – Димитрова; г) типичные автокорреляционные функции скоростей затопления шахт, 1 – Бутовская, 2 – Ягуновская, 3 – Северный Маганак

Временной тренд описывается зависимостью:

$$V_s = ae^{-bt} + c \quad (2)$$

где a , b , c – коэффициенты, определяемые для каждой шахты по методу наименьших квадратов.

Выражение (2) характеризует процесс восстановления депрессионных воронок, образовавшихся в ходе строительства и многолетних периодов эксплуатации шахт Кузбасса.

Устранив временной тренд, получим колебательный процесс скорости относительно нулевой средней (рис. 3, в). Устранение временного тренда по каждой шахте снижает общую дисперсию колебаний скорости от 0,2% (шахта Северный Маганак) до 79,7% (ш. Нагорная).

Колебания скорости затопления относительно нулевой средней (остаточные колебания скорости затопления V_0) можно считать стационарной случайной функцией. Согласно эргодическому свойству вероятностные характеристики стационарных случайных функций можно определять по одной реализации достаточной длины [2]. Выявление случайных и неслучайных составляющих в остаточных колебаниях скорости затопления и оценки соотношений между ними произведено по автокорреляционным функциям для каждой шахты. В общем случае автокорреляционная функция имеет вид:

$$R(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} V_0(t)V_0(t + \tau)dt \quad (3)$$

где T – продолжительность активного процесса затопления, мес.; t – независимый (текущий) параметр времени, мес; τ – параметр корреляции, мес.

Поскольку замеры затопления производились дискретно, то интеграл в выражении (3) заменяем конечной суммой. Автокорреляционная функция для m значений τ , равных $0, 1, \dots, m$, мес. будет иметь вид:

$$R(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \sum_{i=1}^{T-\tau} V_0(t_i)V_0(t_{i+\tau})$$

При $\tau = 0$ автокорреляционная функция равна дисперсии остаточных колебаний скорости затопления V_0 . Для удобства ее анализа вычислим нормированные корреляционные функции по формуле:

$$R_H(\tau) = R(\tau) / R(0)$$

На рис. 3, г приведены типичные нормированные автокорреляционные функции остаточных колебаний скорости активного процесса затопления шахт.

В общем случае автокорреляционную функцию можно представить в виде:

$$R_H(\tau) = \sum_{i=1}^n D_i \exp(-\alpha_i \tau) + \sum_{j=1}^m D_j \cos(\beta_j \tau) + \sum_{k=1}^z D_k \exp(-\alpha_k \tau) \cos(\beta_k \tau) \quad (4)$$

где: первая сумма элементарных функций представляет случайную составляющую исследуемой скорости V_0 , вторая сумма – чисто периодические колебания и третья сумма – смешанную составляющую (затухающие колебания определенной частоты); D_i, D_j, D_k – коэффициенты, отражающие долю дисперсии колебаний скорости; α_i, α_k – коэффициенты, характеризующие быстроту затухания колебаний скорости V_0 ; β_j, β_k – круговые частоты колебаний скорости V_0 .

Произведена аппроксимация нормированных автокорреляционных функций $R_n(\tau)$ элементами выражения (4).

Для шахты Нагорная имеем:

$$R_n(\tau) = 0,14 \cos(0,5\tau) + 0,04 \cos(1,6\tau) + 0,82e^{-0,82\tau} \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что 82% остаточной дисперсии обусловлено случайными колебаниями и 18% – неслучайными (периодическими с круговой частотой 0,5 и 1,6 1/мес.). Случайная составляющая имеет значительный коэффициент затухания $\alpha = -0,82$, что свидетельствует об отсутствии корреляционной зависимости между интервалами наблюдений процесса затопления во времени.

По круговым частотам β неслучайных составляющих определим периоды колебаний T_k : $T_k = 2\pi/\beta$; $T_{k1} = 2\pi/0,5 = 12,5$ мес.; $T_{k2} = 2\pi/1,6 = 3,9$ мес.

Это значит, что ежегодные весенние паводки и сезонные осадки оказывают влияние на колебания скорости затопления шахт. Для большинства шахт рассчитанные автокорреляционные функции удовлетворительно аппроксимируются выражением:

$$R_n(\tau) = D_1 e^{-\alpha_1 \tau} + D_2 \cos(\beta_2 \tau) + D_3 \cos(\beta_3 \tau) \quad (6)$$

Параметры аппроксимации по выражению (6) приведены в табл. 2, анализ которой показывает, что от 40 до 87% (среднее 68,8%) дисперсии скорости затопления шахт вызваны случайными колебаниями с большим коэффициентом затухания α_1 . Случайные колебания порождены неравномерным распределением объема выработанного пространства по глубине шахт, наличием в погашенных выработках различного вида перемычек, целиков угля, обрушенных пород, устойчивых куполов и других техногенных образований. Временная герметичность перемычек небольшой прочности, разделяющих выработанное пространство на отдельные блоки, с повышением уровня воды при затоплении

Таблица 2

Параметры аппроксимации автокорреляционных функций скоростей затопления консервируемых шахт Кузбасса

Шахта	Параметры аппроксимации					
	D_1	α_1	D_2	α_2	D_3	α_3
1. Северная	0,85	-5,0	0,10	1,60	0,05	2,30
2. Южная	0,70	-3,0	0,20	0,51	0,10	1,90
3. Лапичевская	0,60	-5,0	0,25	0,55	0,15	1,67
4. Бутовская	0,50	-0,9	0,40	0,29	0,10	1,10
5. Волкова	0,75	-3,0	0,20	0,45	0,05	2,30
6. Анжерская	0,87	-0,9	0,08	0,26	0,05	1,40
7. Красный Углекоп	0,70	-1,0	0,25	0,45	0,05	2,30
8. Димитрова	0,65	-4,0	0,25	0,50	0,10	1,60
9. ш/у Кольчугинское	0,82	-3,9	0,10	0,60	0,08	1,75
10. Красный Кузбасс	0,60	-3,0	0,30	0,55	0,10	2,30
11. Бирюлинская	0,40	-2,0	0,50	0,51	0,10	2,09
12. Нагорная	0,82	-0,8	0,14	0,50	0,04	1,60

«продавливается» возрастающим напором с перетоком ее в ранее незатопленное пространство, что вызывает резкие колебания общей скорости затопления шахты. Геогидродинамические процессы, происходящие в техногенных массивах консервируемых шахт Кузбасса как во время так и после их затопления, мало изучены.

На неслучайные периодические колебания с круговыми частотами 0,45–0,6 1/мес. (среднее 0,51 1/мес.), обусловленными весенними паводками, приходится в среднем 22,3% дисперсии колебаний скорости затопления шахт. Исключение составляют шахты Анжерская и Бутовская, где в автокорреляционных функциях наблюдаются неслучайные колебания с двухгодичным периодом. Если на ш. Анжерская их доля в общей дисперсии колебаний всего 8%, то на ш. Бутовская она составляет 40%. Периодические колебания с частотами 1,1–2,3 1/мес. (среднее 1,84 1/мес.) обусловлены сезонными изменениями водопритока в шахты и составляют в среднем 8,9% от общей дисперсии остаточных колебаний скорости затопления шахт.

Нормированные автокорреляционные функции скорости затопления шахт Бунгурская, Ягуновская и Северный Маганак аппроксимируются выражением:

$$R_{\tau}(\tau) = D_1 e^{-\alpha_1 \tau} + D_2 e^{-\alpha_2 \tau} \cos(\beta_2 \tau) + D_3 \cos(\beta_3 \tau)$$

На ш. Ягуновская дисперсия колебаний скорости затопления формируется в основном периодическими затухающими колебаниями с полугодичным периодом (55%) и случайными колебаниями (43%). А 2% дисперсии приходится на сезонные колебания скорости затопления. На шахте Бунгурская дисперсия колебаний скорости затопления на 80% сформирована затухающими периодическими колебаниями с годичным периодом, на 18% случайными колебаниями и 2% – сезонным влиянием. Шахта затоплена на 70% в весенне-летний период. На ш. Северный Маганак аналогичные доли дисперсии составляют: 55%, 37% и 8%.

Полагая, что динамика водопритока в действующие шахты аналогична рассмотренным, то при разработке технических решений по водоотливу можно использовать результаты приведенных исследований.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

- консервация шахт Кузбасса «мокрым» и комбинированным способами сопровождается большими колебаниями скоростей затопления, анализ дисперсии которых можно произвести с использованием методов теории случайных функций;
- установлено, что колебания скорости имеют случайную и неслучайную (периодическую) составляющие. Периодическая составляющая колебаний обусловлена сезонными и паводковыми изменениями водопритока в шахты и составляет в среднем 30% от общей дисперсии. Случайная составляющая колебаний (70% общей дисперсии) обусловлена происходящими при затоплении шахт геогидродинамическими процессами, которые в горно-геологических условиях Кузбасса малоизучены;
- по характеру изменения скорости затопления во времени исследуемые консервируемые шахты можно разделить на четыре группы;
- при консервации новых шахт Кузбасса прогнозную оценку процесса затопления можно произвести по установленной формуле (1), а изменение средней скорости восстановления депрессионной воронки во времени по выражению (2) при коэффициентах $a = 26,3$, $b = 0,1$, $c = 1,6$, определенных по всей совокупности данных наблюдений консервации рассмотренных шахт для t в интервале $[0; 60]$ мес.

1. Руководство по проведению мониторинга подземных вод и прогнозу изменения гидрогеологических условий при затоплении ликвидированных шахт Кузбасса. – Кемерово: СФ ВНИМИ, 2008. – 76 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 576 с. **VIAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Быкадоров Алексей Иванович¹ – кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: aibyadorov@mail.ru,

Ларичкин Петр Михайлович¹ – кандидат технических наук заведующий отделом анализа и методической подготовки, e-mail: larichkin.petr@yandex.ru,

Свирко Сергей Владимирович¹ – заместитель заведующего отделом анализа и методической подготовки, e-mail: svirko@ngs.ru,

Ягунова Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, главный инженер проекта ООО «Сибгеопроект» (ООО «СПП»), e-mail: yagunovaolga@gmail.com,

¹ ООО «Сибирский институт геотехнических исследований» (ООО «СИГИ»).

UDC 622.512

**ANALYSIS OF DYNAMICS OF FLOODING
IN MINE CONSERVATION IN KUZBASS**

Bykadorov A.I.¹, Candidate of Technical Sciences, General Director, e-mail: aibyadorov@mail.ru,

Larichkin P.M.¹, Candidate of Technical Sciences Head of Analysis and Methodical Guidance Department, e-mail: larichkin.petr@yandex.ru,

Svirko S.V.¹, Deputy Head of Analysis and Methodical Guidance Department, e-mail: svirko@ngs.ru,

Yagunova O.A., Candidate of Technical Sciences, Chief Project Engineer, Sibgiproject LTD, e-mail: yagunovaolga@gmail.com,

¹ Siberian Institute of Geotechnical Research.

There are two main methods of mine conservation in Kuzbass. The first of them is a completely flooding to spouting point, which is called «wet method». The second way of conservation («combined method») is a supporting the groundwater level at a certain point, which is determined by the conditions of exception flows to adjacent operating mines as a rule. The 15 flooding mines of Kuzbass are reviewed. There are regular measurements of groundwater level from the beginning of their liquidation in these mines. The periods of the active process of flooding (from the beginning to the moment when the level of the floodwaters rosed the surface aquifers and the process of flooding took protracted, or to special mark point when pumping-out started in the flooded mine) are analyzed. The results of the analysis reveals that the conservations of the mines in Kuzbass by «wet» and «combined» methods are specified by large fluctuations in the velocity of flooding, the analysis of variance of which can be produced by using methods of the theory of random functions. The groups of flooding mines are defined by speed's characters of flooding. The method and the results of the analysis of variance of the speeds of flooding are given. The regularity of the speed of the flooding new mines is revealed by analysis of all performed measurements. This regularity has exponential character with defined parameters and can be used for flooding predictions.

Key words: mine, conservation, the speed of flooding, the dynamics of the flooding process, correlation function, analysis.

REFERENCES

1. Rukovodstvo po provedeniyu monitoringa podzemnykh vod i prognozu izmeneniya gidrogeologicheskikh usloviy pri zatoplenii likvidirovannykh shakht Kuzbassa (Manual on ground water monitoring and hydrological variation prediction in flooding abandoned mines in Kuzbass), Kemerovo, SF VNIIMI, 2008, 76 p.
2. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostey (Probability theory), Moscow, Nauka, 1964, 576 p.