Богомолов А.Н., Богомолова О.А., Степанова Е.А., Ушаков А.Н. Влияние формы и размеров поперечного сечения подземной выработки на величину осадки дневной поверхности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 123–134. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.13

Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Stepanova E.A., Ushakov A.N. Influence of the shape and dimensions of the cross section of underground workings on the magnitude of the rainfall surface. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2017. Vol. 8, no. 2. Pp. 123-134. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.13

**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**
Т. 8, № 2, 2017
**PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.13

УДК 624.154.5

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ОСАДКИ ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, Е.А. Степанова, А.Н. Ушаков

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 30 мая 2017
Принята: 15 июня 2017
Опубликована: 30 июня 2017

Ключевые слова:

подземная выработка, форма и размер поперечного сечения, осадки земной поверхности, коэффициент бокового давления вмещающего массива

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты анализа влияния на осадки дневной поверхности формы поперечного сечения, глубины заложения и поперечных размеров подземной выработки при разных численных значениях коэффициента бокового давления вмещающего грунта. Рассмотрены особенности изменения величин вертикальных перемещений точек земной поверхности, расположенных на оси симметрии выработки, для сечений выработок в форме квадрата, половины эллипса, окружности и дельтоиды в зависимости от их геометрических размеров, глубины заложения и величины коэффициента бокового давления вмещающего массива. Представлены графики изменения величины вертикального смещения точек земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработок с сечением в виде квадрата, круга, половины эллипса и дельтоиды по мере увеличения глубины их заложения. Приведенные результаты сопоставлены с результатами работ других авторов. Установлено, что при достижении некоторых значений глубины заложения и размеров поперечного сечения выработки влияние указанных факторов становится существенным и возникает задача об оптимальной форме поперечного сечения выработки, обеспечивающей минимальные по величине осадки земной поверхности.

© ПНИПУ

Богомолов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.
Богомолова Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, профессор, e-mail: boazaritcyn@mail.ru.
Степанова Екатерина Александровна – аспирант, e-mail: ekserstepan@bk.ru.
Ушаков Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, профессор, e-mail: ushakov.andrej2012@yandex.ru.

Aleksandr N. Bogomolov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.
Oksana A. Bogomolova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor, e-mail: boazaritcyn@mail.ru.
Ekaterina A. Stepanova – Postgraduate Student, e-mail: ekserstepan@bk.ru.
Andrei N. Ushakov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor, e-mail: ushakov.andrej2012@yandex.ru.

INFLUENCE OF THE SHAPE AND DIMENSIONS OF THE CROSS SECTION OF UNDERGROUND WORKINGS ON THE MAGNITUDE OF THE RAINFALL SURFACE

A.N. Bogomolov, O.A. Bogomolova, E.A. Stepanova, A.N. Ushakov

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 30 May 2017
Accepted: 15 June 2017
Published: 30 June 2017

Keywords:

underground working, shape and size of the cross section, settlement of the daylight, the lateral pressure coefficient of the containing array

ABSTRACT

The results of the analysis of the influence of settlement on the daylight of the cross-sectional shape, depth and transverse dimensions of the underground workings at different numerical values of the lateral pressure coefficient host rock. In the article the peculiarities of changes in the values of the vertical displacements of the ground points located on the symmetry axis of generation, for cross sections of workings in the form of a square, half ellipse, circle and deltoids, depending on their geometric dimensions, depth and the coefficient of lateral pressure of the containing array. Presents graphs of the magnitude of the vertical displacement of ground points lying on the axis of symmetry of workings with a cross section in the form of a square, a circle, a half ellipse and deltoids, as you increase the depth of their laying. The results are compared with the results of other authors. It is established that upon reaching certain values, depth and cross-sectional dimensions of development, the impact of these factors becomes significant and there is the problem of the optimal shape of the cross section of development that provides a minimum amount of precipitation the earth's surface.

© PNRPU

В работе [1] приведена часть результатов численного моделирования процесса оседания земной поверхности, расположенной над горизонтальными подземными выработками, форма поперечного сечения которых представляет собой квадрат и половину эллипса.

Установлено, что если вмещающий массив однороден и изотропен, то величина максимального перемещения точки земной поверхности, расположенной на оси симметрии выработки, зависит от величины коэффициента бокового давления грунта, глубины заложения выработки H , размеров и формы ее поперечного сечения. Причем при всех прочих равных условиях перемещение этой точки земной поверхности, расположенной над полуэллиптической выработкой, всегда значительно меньше, чем в случае, когда форма поперечного сечения представляет собой квадрат.

Показано, что мульда оседания для всех рассмотренных вариантов расчета имеет седлообразную форму (рис. 1), что согласуется с результатами исследований других авторов и натурных наблюдений [2–12].

При увеличении коэффициента бокового давления вмещающего грунта (породы) ξ_0 и глубины заложения выработки (при неизменных других условиях) величины вертикальных смещений точек дневной поверхности уменьшаются. Увеличение геометрических размеров поперечного сечения выработки, напротив, во всех случаях ведет к увеличению численных значений вертикальных смещений.

Численное решение выполнено в упругой постановке при помощи компьютерных программ [13, 14]. Отметим, что при проведении вычислений величина модуля упругости вмещающих пород принята равной $\frac{E}{\gamma H} = 500$, где γ – объемный вес пород, H – глубина заложения выработок, т.е. E – величина безразмерная. Численные значения вертикальных смещений при проведении вычислений также получаются безразмерными. Это удобно для количественного анализа, так как нас интересуют не конкретные значения перемещений, а лишь закономерности изменения их величин в зависимости от изменения численных зна-

чений переменных расчетных параметров. В качестве таких параметров, как уже говорилось выше, выступают форма и размеры поперечного сечения выработки, глубина ее заложения и коэффициент бокового давления вмещающих пород.

Рис. 1. Графики оседания земной поверхности над подземной выработкой (полуэллипс размером 4×4 м), отработанной на глубине 5,2 (а), 10,0 (б), 15,2 (в) и 20 м (г) при различных численных значениях $\xi_0 = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$
Fig. 1. Graphs of subsidence of the daylight above the underground production (half ellipse size 4×4 m) tested at a depth of 5.2 (a), 10.0 (b), 15.2 (c) and 20 m (d) with different numerical values $\xi_0 = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$

В данной работе поставлена задача установить особенности изменения величин вертикальных перемещений точек земной поверхности, расположенных на оси симметрии выработки, при условии что сечения выработок имеют форму квадрата, половины эллипса, окружности и дельтоиды в зависимости от их геометрических размеров, глубины заложения и величины коэффициента бокового давления вмещающего массива. Принято, что поперечные размеры выработок (стороны квадрата, в который вписаны соответствующие геометрические фигуры (рис. 2)) принимают значения 2,4×2,4, 4,0×4,0 и 8,0×8,0 м, глубина заложения выработок H равна 5,2; 10,0; 15,2 и 20 м, а величина коэффициента бокового давления $\xi_0 = 0,2; 0,5; 0,75; 0,99$.

Как видно на рис. 2, поперечные размеры дельтоиды несколько больше поперечных размеров остальных фигур. Будем считать, что при расчете это идет в запас.

На рис. 3–5 приведены графические интерпретации зависимостей вида $\delta = f(H)$, которые показывают, как изменяются величины вертикального смещения точек земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработок с сечением в виде квадрата, круга, половины эллипса и дельтоиды, по мере увеличения глубины их заложения.

Рис. 2. Формы поперечного сечения подземной выработки: *a* – дельтоида; *б* – круг вписан в квадрат; *в* – половина эллипса вписана в квадрат; *г* – астроида вписана в квадрат
Fig. 2. Cross section underground workings: *a* – deltoid; *b* – the circle inscribed in a square; *c* – half of the ellipse inscribed in the square; *d* – astroid inscribed in a square

Рис. 3. Кривые $\delta = f(H)$ в зависимости от величины вертикального смещения точки земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработки с сечением в виде квадрата (1), круга (2), половины эллипса (3) и дельтоиды (4), при условии что их поперечные размеры $2,4 \times 2,4$ м, а величина коэффициента бокового давления вмещающего грунта принимает значения $\xi_0 = 0,2$ (а); $0,5$ (б); $0,75$ (в); $0,99$ (г) соответственно

Fig. 3. The curves $\delta = f(H)$ dependence of the magnitude of vertical displacement of the point on the surface lying on the axis of symmetry of the production cross-section in the form of a square (1), circle (2), half of the ellipse (3) and deltoids (4), provided that their transverse dimensions of 2.4×2.4 m, and the coefficient of lateral pressure host rock takes values $\xi_0 = 0,2$ (a); $0,5$ (b); $0,75$ (c); $0,99$ (d)

Рис. 4. Кривые $\delta = f(H)$ в зависимости от величины вертикального смещения точки земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработки с сечением в виде квадрата (1), круга (2), половины эллипса (3) и дельтоиды (4), при условии что их поперечные размеры 4×4 м, а величина коэффициента бокового давления вмещающего грунта принимает значения $\xi_0 = 0,2$ (а); $0,5$ (б); $0,75$ (в); $0,99$ (г) соответственно

Fig. 4. The curves $\delta = f(H)$ dependence of the magnitude of vertical displacement of the point on the surface lying on the axis of symmetry of the production cross-section in the form of a square (1), circle (2), half of the ellipse (3) and deltoids (4), provided that their transverse dimensions of 4×4 m, and the coefficient of lateral pressure host rock takes values $\xi_0 = 0,2$ (a); $0,5$ (b); $0,75$ (c); $0,99$ (d)

Качественный анализ кривых показывает, что для выработок с любой из рассмотренных форм поперечного сечения при значениях коэффициента бокового давления грунта $\xi_0 \geq 0,75$ они вогнуты вниз, на всех кривых имеется локальный максимум, который соответствует глубине заложения выработок, равной приблизительно 10 м. Исключение составляют только кривые, построенные для выработок квадратного сечения с поперечными размерами 4×4 м при коэффициенте бокового давления вмещающего грунта $\xi_0 \leq 0,75$ и с поперечными размерами 8×8 м при всех рассмотренных численных значениях этого коэффициента. Эти кривые с достаточной для практики степенью точности аппроксимируются прямыми линиями.

При $\xi_0 = 0,99$ знак кривизны меняется на противоположный, кривые становятся выпуклыми, за исключением уже оговоренных и кривых, построенных для выработок, расположенных на глубине 20 м, которые имеют размеры поперечного сечения 8×8 м.

На рис. 6–9 приведены графические интерпретации зависимостей вида $\delta = f(\xi_0)$, построенные для выработок, имеющих те же характеристики. На этих рисунках хорошо видно, что полученные кривые близки к прямым линиям, т.е. величина вертикального смещения точек, расположенных на пересечении осей симметрии выработок и линии дневной поверхности, практически линейно зависит от величины коэффициента бокового давления (распора) вмещающего грунта.

Рис. 5. Кривые вида $\delta = f(H)$ в зависимости от величины вертикального смещения точки земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработки с сечением в виде квадрата (1), круга (2), половины эллипса (3) и дельтоиды (4), при условии что их поперечные размеры 8×8 м, а величина коэффициента бокового давления вмещающего грунта принимает значения $\xi_0 = 0,2$ (а); $0,5$ (б); $0,75$ (в); $0,99$ (г) соответственно

Fig. 5. The curves $\delta = f(H)$ dependence of the magnitude of vertical displacement of the point on the surface lying on the axis of symmetry of the production cross-section in the form of a square (1), circle (2), half of the ellipse (3) and deltoids (4), provided that their transverse dimensions of 8×8 m, and the coefficient of lateral pressure host rock takes values $\xi_0 = 0,2$ (a); $0,5$ (b); $0,75$ (c); $0,99$ (d)

Рис. 6. Кривые зависимостей вида $\delta = f(\xi_0)$ для выработок, имеющих контур в виде дельтоиды, с поперечными размерами $2,4$ (а), 4 (б), 8 м (в), расположенных на глубине $5,2$ (1), 10 (2), $15,2$ (3) и 20 м (4)

Fig. 6. Curves of dependences of the form $\delta = f(\xi_0)$ for workings having a contour in the form of deltoids, with transverse dimensions of 2.4 (a); 4 (b); 8 m (c) located at a depth of 5.2 (1) 10 (2); 15.2 (3) and 20 m (4)

Следует отметить, что при численном значении коэффициента бокового давления вмещающего грунта, близком по величине к единице ($\xi_0 = 0,99$), величины вертикальных смещений этих точек, расположенных над выработками квадратной, круглой и полуэллиптической формы, стремятся вне зависимости от глубины заложения выработки к пределу, который для каждой формы поперечного сечения выработки имеет свое численное значение. Однако этого нельзя сказать в том случае, когда поперечное сечение подземной выработки имеет форму дельтоиды (см. рис. 6).

Рис. 7. Кривые зависимостей вида $\delta = f(\xi_0)$ для выработок, имеющих контур в виде окружности, с поперечными размерами 2,4 (а), 4 (б), 8 м (в), расположенных на глубине 5,2 (1), 10 (2), 15,2 (3) и 20 м (4)

Fig. 7. Curves of dependences of the form $\delta = f(\xi_0)$ for workings having a contour in the form of a circle, with transverse dimensions of 2.4 (a), 4 (b), 8 m (c) located at a depth of 5.2 (1), 10 (2), 15.2 (3) and 20 m (4)

Рис. 8. Кривые зависимостей вида $\delta = f(\xi_0)$ для выработок, имеющих контур в виде половины эллипса, с поперечными размерами 2,4 (а), 4 (б), 8 м (в), расположенных на глубине 5,2 (1), 10 (2), 15,2 (3) и 20 м (4)

Fig. 8. Curves of dependences of the form $\delta = f(\xi_0)$ for workings having a contour in the form of a half ellipse, with transverse dimensions of 2.4 (a), 4 (b), 8 m (c) located at a depth of 5.2 (1), 10 (2), 15.2 (3) and 20 m (4)

Для удобства количественного анализа влияния переменных расчетных параметров составлена таблица, в которой приведены безразмерные численные значения вертикальных смещений точек земной поверхности, лежащей на оси симметрии выработки, которые вычислены для всех рассмотренных в работе вариантов.

Рис. 9. Кривые зависимостей вида $\delta = f(\xi_0)$ для выработок, имеющих контур в виде квадрата, с поперечными размерами 2,4 (а), 4 (б), 8 м (в), расположенных на глубине 5,2 (1), 10 (2), 15,2 (3) и 20 м (4)
Fig. 9. Curves of dependences of the form $\delta = f(\xi_0)$ for workings having a contour in the form of a square, with transverse dimensions of 2.4 (a), 4 (b), 8 m (c) located at a depth of 5.2 (1), 10 (2), 15.2 (3) and 20 m (4)

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что численные значения вертикальных смещений рассматриваемых точек зависят от поперечных размеров выработки, формы ее поперечного сечения, глубины заложения и коэффициента бокового давления. Если рассматривать выработки, у которых размеры поперечного сечения не превышают 4×4 м, то окажется, что при всех прочих равных условиях наибольшие перемещения соответствуют выработке с формой поперечного сечения в виде дельтоиды.

Далее в порядке уменьшения величин перемещений следуют выработки, имеющие форму поперечного сечения в виде квадрата, круга и половины эллипса. Причем численные значения перемещений в зависимости от формы выработки отличаются друг от друга незначительно.

Аналогичный вывод сделан автором работы [14], где сказано, «что форма контура незначительно влияет на величину сдвига, так что при расчете контур в большинстве случаев можно заменить прямоугольником такой же высоты». В работе [14] не приведены данные о величине коэффициента бокового давления вмещающего грунта, а лишь сказано, что «проведены расчеты на интеграторе ЭГДА-6/51». Графическая интерпретация результатов, полученных автором данной работы, приведены на рис. 10.

Если поперечный размер выработок составляет 8×8 м, а глубина заложения равна 15,2 м и более, то картина меняется. Если для этих условий ранжировать форму выработок в порядке увеличения вертикальных перемещений рассматриваемых точек, то минимальные перемещения будут соответствовать выработке, имеющей поперечное сечение в виде дельтоиды, затем следуют выработки с поперечным сечением в виде половины эллипса, круга и квадрата. Например, если рассмотреть выработки с поперечным размером 8×8 м, расположенных на глубине 20 м, при условии что коэффициент бокового давления вмещающих пород равен $\xi_0 = 0,2$, то окажется, что вертикальные перемещения рассматриваемых точек дневной поверхности, расположенные над выработками с сечением в виде половины эллипса, круга и квадрата, соответственно в 1,2; 1,48 и 1,9 раза больше, чем точек расположенных над выработкой, сечение которых имеет форму дельтоиды. Если коэффициент бокового давления $\xi_0 = 0,99$, то разница перемещений составляет почти 3, 4 и 7 раз соответственно.

Вертикальные смещения точек земной поверхности, лежащих на оси симметрии выработки
The vertical displacement of the earth's surface points lying on the symmetry axis of generation

ξ ₀	Форма и размер поперечного сечения											
	Полуэллипс, 2,4×2,4 м	Квадрат, 2,4×2,4 м	Круг, 2,4×2,4 м	Дельтоида, 2,4×2,4 м	Полуэллипс, 4×4 м	Квадрат, 4×4 м	Круг, 4×4 м	Дельтоида, 4×4 м	Полуэллипс, 8×8 м	Квадрат, 8×8 м	Круг, 8×8 м	Дельтоида 8×8 м
Вертикальные смещения при глубине заложения выработки 5,2 м												
0,2	-0,1320	-0,2680	-0,1960	-0,3200	-0,5680	-0,8300	-0,6000	-0,8160	-2,3000	-3,9480	-2,7080	-2,9080
0,5	-0,0720	-0,1760	-0,1160	-0,2360	-0,3280	-0,5800	-0,3640	-0,5920	-1,3520	-2,9520	-1,7480	-1,9920
0,75	-0,0280	-0,1040	-0,0520	-0,1680	-0,1480	-0,3800	-0,1920	-0,4120	-0,6600	-2,1880	-0,9760	-1,2920
0,99	0,0012	0,029	0,022	-0,0840	0,0012	-0,0500	0,0440	-0,2000	-0,0160	-1,1520	-0,3080	-0,6160
Вертикальные смещения при глубине заложения выработки 10 м												
0,2	-0,1640	-0,3200	-0,2440	-0,3120	-0,6600	-0,9100	-0,6920	-0,7640	-2,2760	-3,5680	-2,6960	-2,3400
0,5	-0,1000	-0,2120	-0,1520	-0,2240	-0,4000	-0,6200	-0,4360	-0,5200	-1,3400	-2,5520	-1,7520	-1,4640
0,75	-0,0520	-0,1280	-0,0840	-0,1520	-0,2040	-0,3900	-0,2480	-0,3360	-0,6640	-1,7960	-1,0560	-0,8240
0,99	0,0008	0,0022	0,0019	-0,0760	0,0000	-0,1100	-0,0320	-0,1600	-0,1320	-1,0000	-0,4160	-0,3760
Вертикальные смещения при глубине заложения выработки 15,2 м												
0,2	-0,1520	-0,2920	-0,2240	-0,2560	-0,5760	-0,7900	-0,6120	-0,5880	-1,8240	-2,8440	-2,1840	-1,6240
0,5	-0,0920	-0,1920	-0,1400	-0,1720	-0,3440	-0,5200	-0,3840	-0,3760	-1,0480	-1,9800	-1,4040	-0,9240
0,75	-0,0480	-0,1120	-0,0800	-0,1120	-0,1720	-0,3200	-0,2120	-0,2200	-0,4920	-1,3680	-0,8360	-0,4200
0,99	0,0017	-0,0120	-0,0040	-0,0560	-0,0160	-0,1100	-0,0480	-0,1160	-0,1280	-0,7960	-0,3760	-0,1880
Вертикальные смещения при глубине заложения выработки 20 м												
0,2	-0,1200	-0,2280	-0,1800	-0,1880	-0,4360	-0,6000	-0,3480	-0,4240	-1,2960	-2,0560	-1,5960	-1,0760
0,5	-0,0720	-0,1440	-0,1120	-0,1200	-0,2520	-0,3900	-0,2920	-0,2600	-0,7320	-1,4240	-1,0200	-0,5680
0,75	-0,0400	-0,0880	-0,0600	-0,0720	-0,1240	-0,2400	-0,1640	-0,1400	-0,3240	-0,9600	-0,6000	-0,2000
0,99	-0,0040	-0,0160	-0,0080	-0,0400	-0,0240	-0,0900	-0,0480	-0,0800	-0,25000	-0,5960	-0,2920	-0,0840

Рис. 10. Расчетная схема (а); влияние формы контура области разрушения на величину перемещений поверхности (б); принятая форма контура (в) [14]

Fig. 10. Design scheme (a); the influence of the shape of the contour of the destruction area the amount of surface displacements (b); the accepted form of loop (c) [14]

Вывод: вертикальные перемещения точек земной поверхности, находящихся над выработкой, при условии что глубина ее заложения более 15,2 м, а размеры поперечного больше, чем 4×4 м, существенным образом зависят от формы поперечного сечения и коэффициента бокового давления вмещающего грунта. Следовательно, возникает задача об оптимальной форме поперечного сечения выработки, обеспечивающей минимальные по величине осадки.

Библиографический список

1. Численный анализ оседания земной поверхности над горизонтальными выработками / А.Н. Богомолов, Е.А. Степанова, О.А. Богомоллова, Е.В. Цветкова, Е.М. Либурацков // Вестник Волгогр. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2016. – Вып. 45 (64). – С. 12–26.
2. Кульпин Л.Г. Баренцево море. Прогноз и преодоление техногенных осложнений при разработке газовых гигантов в условиях гидратонасыщенности придонных слоев и опускания дна моря // Новые технологии разработки и повышения нефтеотдачи: тр. междунар. технолог. симпозиума. – М., 2005. – С. 1–8.
3. Осадки грунта, вызванные проходкой тоннелей (на примере тегеранского метро) / Чакери Хамид, Талибинежад Ализера, Мусави Магди, Юнвер Бахтияр // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2012. – № 4. – С. 12–15.
4. Карасев М.А. Прогноз оседания земной поверхности при строительстве подземных сооружений глубокого заложения в условиях Санкт-Петербурга // Записки Гор. ин-та. – СПб., 2013. – Т. 204. – С. 248–254.
5. Спутниковый радарный интерферометрический мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна / Ф.К. Низаметдинов, Д.В. Мозер, Н.И. Гей, А.С. Туякбай, А.Д. Каранеева // Геоматика. – 2014. – № 4. – С. 70–77.

6. Пыжов С.В., Антощенко Н.И., Филатьев М.В. Теоретическое обоснование параметров минимально возможной степени подработанности земной поверхности при выемке угольных пластов // Збірник наукових праць, ДонДТУ. – 2014. – № 2 (43). – С. 30–34.
7. Писаренко М.В., Борисов И.Л. Использование гистехнологий для определения ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности // Маркшейдерия и недропользование. – 2009. – № 1 (39). – С. 69–71.
8. Петрухин В.П., Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф. Определение зоны влияния строительства коммуникационных тоннелей // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2013. – № 4. – С. 24–27.
9. Карасев М.А., Беляков Н.А. Прогноз деформаций земной поверхности при строительстве станций метрополитена в твердых глинах // Известия Тул. гос. ун-та. Науки о Земле. – 2016. – Вып. 1. – С. 139–155.
10. Бугаева Н.А. Научные основы стохастического прогноза деформаций земной поверхности при ее подработке // Наукові праці ДонНТУ. Гірничо-геологічна. – 2011. – Вип. 13 (178). – С. 63–69.
11. Сдвигение горных пород и земной поверхности при подземных разработках / под общ. ред. В.А. Букринского, Г.В. Орлова. – М.: Недра, 1984. – С. 39–44.
12. FEA: св-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2015617889 / А.Н. Богомолов [и др.]. Зарег. 23 июля 2015 г.
13. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние): св-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2009613499 / А.Н. Богомолов [и др.]. Зарег. 30 июня 2009 г.
14. Лапидус Л.С. К вопросу расчета перемещений земной поверхности, вызванных подземными работами // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1961. – № 1. – С. 20–22.

References

1. Bogomolov A.N., Stepanova E.A., Bogomolova O.A., Tsvetkova E.V., Liburatskov E.M. Chislennyi analiz osedaniia zemnoi poverkhnosti nad gorizontallynymi vyrabotkami [The numerical analysis of ground surface subsidence over horizontal developments]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2016, iss. 45(64), pp. 12-26.
2. Kul'pin L.G. Barentsevo more. Prognoz i preodolenie tekhnogennykh oslozhnenii pri razrabotke gazovykh gigantov v usloviakh gidratonasyshchennosti pridonnykh sloev i opuskaniia dna moria [Barents sea. Forecast and overcome technological complications in the development of the gas giants in terms of girtonians bottom layers and lowering the bottom of the sea]. *Trudy mezhdunarodnoi tekhnologicheskogo simpoziuma «Novye tekhnologii razrabotki i povysheniia nefteotdachi*. Moscow, 2005, pp. 1-8.
3. Chakeri Khamid, Talibinezhad Alizera, Musavi Magdi, Iunver Bakhtiiar. Osadki grunta, vyzvannye prokhodkoi tonnelei (na primere Tegeranskogo metro) [Ground subsidence caused by tunnel driving (on the example of the Tehran metro)]. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*, no. 4, 2012, pp. 12-15.
4. Karasev M.A. Prognoz osedaniia zemnoi poverkhnosti pri stroitel'stve podzemnykh sooruzhenii glubokogo zalozeniia v usloviakh Sankt-Peterburga [Forecast of earth surface subsidence in the construction of underground structures deep Foundation in St. Petersburg]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2013, vol. 204, pp. 248-254.

5. Nizametdinov F.K., Mozer D.V., Gei N.I., Tuiakbai A.S., Karaneeva A.D. Sputnikovy radarnyi interferometricheskii monitoring podrobotannykh territorii Karagandinskogo ugol'nogo basseina [Satellite radar interferometric monitoring of undermined territories of the Karaganda coal basin]. *Geomatika*, no. 4, 2014, pp. 70-77.

6. Pyzhov S.V., Antoshchenko N.I., Filat'ev M.V. Teoreticheskoe obosnovanie parametrov minimal'no vozmozhnoi stepeni podrobotannosti zemnoi poverkhnosti pri vyemke ugol'nykh plastov [The theoretical justification of parameters of the minimal possible degree of underminenist the earth's surface during extraction of coal seams]. *Zbirnik naukovikh prats'*, DonDTU, 2014, no. 2 (43), pp. 30-34.

7. Pisarenko, M.V. Borisov, I.L. Ispol'zovanie gistekhnologii dlia opredeleniia ozhidaemykh sdvizhenii i deformatsii zemnoi poverkhnosti [The use of GIS to determine the expected displacement and deformation of the earth's surface]. *Marksheideriia i nedropol'zovanie*, 2009, no. 1(39), pp. 69-71.

8. Petrukhin V.P., Isaev O.N., Sharafutdinov R.F. Opredelenie zony vliianiia stroitel'stva kommunikatsionnykh tonnelei [The definition of the zone of influence of construction of communication tunnels]. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2013, no. 4, pp. 24-27.

9. Karasev M.A., Beliakov N.A. Prognoz deformatsii zemnoi poverkhnosti pri stroitel'stve stantsii metropolitena v tverdykh glinakh [The forecast deformations of the ground surface during the construction of metro stations in solid clay]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2016, iss. 1, pp. 139-155.

10. Bugaeva, N. A. Nauchnye osnovy stokhasticheskogo prognoza deformatsii zemnoi poverkhnosti pri ee podrobotke [The scientific basis of stochastic prediction of the deformations of the ground surface during part]. *Naukovi pratsi DonNTU. Girnicho-geologichna*, 2011, iss. 13(178), pp. 63–69.

11. Sdvizhenie gornykh porod i zemnoi poverkhnosti pri podzemnykh razrabotkakh [The displacement of rocks and earth's surface in underground mines]. Ed. V.A. Bukrinskii, G.V. Orlov. Moscow, Nedra, 1984, pp. 39-44.

12. Bogomolov A.N. FEA. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2015617889*.

13. Bogomolov A.N. Ustoichivost' (Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie) [Stability (Stress-strain state)]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2009613499*.

14. Lapidus L.S. K voprosu rascheta peremeshchenii zemnoi poverkhnosti, vyzvannykh podzemnymi rabotami [To the question of calculating the displacement of the earth's surface caused by underground workings]. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1961, no. 1, pp. 20-22.