

УДК 622.1

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БУРОВЫХ ПЛОЩАДОК И ПОДЪЕЗДНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ВЕРХНЕЧОНСКОМ НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

© В.И. Снетков¹, В.И. Шмонин²

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, 667074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Как и в любом строительстве, буровым работам предшествует этап подготовительных работ по созданию буровых площадок и подъездных дорог к ним. Отсыпка дорожного полотна и самих площадок производится материалом, который добывается открытым способом из карьеров нерудных материалов, в данном случае доломитовой крошкой. При проектировании учитываются необходимые объемы, и в соответствии с ними оформляются горные отводы и лицензии на добычу закладочного материала. Фактически требуется больше объемов горных пород, поскольку под воздействием веса породы в насыпи, работы виброуплотнителей и дорожных машин происходит усадка земной поверхности под основание насыпи, в результате чего требуется дополнительный незапланированный объем для доводки насыпей до проектных отметок, дополнительные геологические запасы и финансовые расходы. На основании экспериментальных буровых работ исследованы закономерности деформации земной поверхности под основанием насыпей дорог и буровых площадок, оценена и обоснована точность замеров, разработан математический аппарат прогнозирования величины деформации земной поверхности под разнонаправленным воздействием статических и динамических нагрузок. Отмечено, что основными факторами, влияющими на деформации, являются особенности рельефа и геологической среды приповерхностной части, высота насыпи, движение груженого транспорта, работа вибромашин. Точность определения границы «насыпь – земля» при принятой технологии производства работ составляет ± 5 см, что не позволяет получить среднее оседание с меньшей ошибкой. Установленная множественная корреляционная связь оседаний с высотой насыпи и расстоянием транспортирования позволяет с точностью ± 11 см прогнозировать развитие деформаций земной поверхности на площади отсыпки будущей кустовой площадки.

Ключевые слова: деформации; насыпь; буровая площадка; закон распределения; корреляция; прогноз; земная поверхность.

EARTH SURFACE DEFORMATION FEATURES UNDER CONSTRUCTION OF DRILLING SITES AND ACCESS ROADS ON THE VERKHNECHONSKOE OIL AND GAS CONDENSATE FIELD

V.I. Snetkov, V.I. Shmonin

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

Like any construction, drilling operations are preceded by the stage of a preparatory work involving building of drilling sites and access roads to them. Roadbeds and platforms are filled with the material extracted by open-cut mining from the pits of nonmetallic materials, in this case dolomitic grit is used. Considered at the design stage necessary volumes determine the located claims and licenses obtained for mining backfilling material. In fact, greater volumes of rocks are required since the weight of rock in the road embankment, operation of vibrating compactors and road-making machinery cause soil shrinkage under the road embankment basis. As a result, to develop embankments up to the design elevation additional unplanned volume is required as well as additional geological stocks and financial costs. On the basis of experimental drilling the paper studies the regularities of earth surface deformation under the basis of road embankments and drilling sites; estimates and proves the

¹Снетков Вячеслав Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел./факс: (3952) 405102, e-mail: snetkov@istu.edu

Snetkov Vyacheslav, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Mining Surveying and Geodesy, tel./fax: (3952) 405102, e-mail: snetkov@istu.edu

²Шмонин Виктор Игоревич, аспирант кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел./факс: (3952) 405102.

Shmonin Viktor, Postgraduate of the Department of Mining Surveying and Geodesy, tel./fax: (3952) 405102.

accuracy of measurements; develops a mathematical apparatus forecasting the value of earth surface deformation under multidirectional influence of static and dynamic loadings. The main factors affecting deformations are found to be the features of relief and geological environment of the near-surface part, embankment height, loaded transport traffic and vibromachine operation. Determination accuracy of the boundary “embankment – earth” is ± 5 cm at the accepted construction technology that doesn't allow to receive average subsidence with a smaller error. Identified multiple correlation connection between subsidence and embankment height and transportation distance allows to predict the development of earth surface deformation on the site of filling a future well pad with the accuracy of ± 1 cm.

Keywords: deformations; embankment; drilling site; law of distribution; correlation; forecast; earth surface.

Одним из элементов освоения Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения является создание сети подъездных автомобильных дорог к участкам буровых работ с целью создания специальных буровых площадок. Отсыпка полотна дорог и буровых площадок осуществляется материалом из близрасположенных доломитовых карьеров.

Район месторождений расположен на слабо расчлененной холмисто-увалистой равнине на осадочных породах нижнего палеозоя с относительными превышениями 120–150 м (абсолютные отметки – 320–450 м). Пологие увалы и холмы вытянуты в северо-западном направлении. Абсолютные отметки на участке составляют 323–342 м.

Почвы района работ дерново-подзолистые, дерново-карбонатные, подзолисто-болотные. Климат района изысканий резко континентальный с холодной продолжительной зимой и коротким относительно жарким летом. По геокриологическому признаку район месторождений относится к области островного распространения многолетнемерзлых пород на всех элементах рельефа и глубокого сезонного промерзания. Многолетнемерзлые грунты вскрыты повсеместно на всей площади месторождений с глубины 0,2–1,3 м. Нормативная глубина промерзания составляет: для суглинков и глин – 256 см; для супесей и песков пылеватых – 312 см; для песков гравелистых и крупных – 334 см.

Отсыпка дорог и буровых площадок осуществляется без предварительной подготовки земной поверхности; высота насыпи колеблется от 1,5 до 2,5 м при отсыпке дорог и до 7 метров при формировании площадок.

В соответствии с проектом в зависимости от рельефа, заданных уклонов дорог, высотных отметок подсчитывается необходимый объем горных пород и соответствующие затраты на добычу, транспортировку и другое. При этом отсутствует методика расчета объемов пород, которые придется дополнительно добыть из карьеров и уложить до достижения проектных отметок из-за просадки поверхностного слоя под воздействием веса отсыпаемого грунта, работающих машин и механизмов, углов откоса основания насыпи, оттайки островной мерзлоты и ряда других трудноучитываемых факторов. Немаловажное значение имеет еще и то, что процесс оседания в определенной степени связан с фактором времени.

Задача по определению дополнительных объемов горных пород решается маркшейдерской службой путем бурения скважин с последующим определением высотной отметки основания насыпи. Поскольку этот вид работ проводится практически после окончания отсыпки, то есть постфактум, это создает серьезные трудности при планировании объемов работ, в ведении маркшейдерской отчетности по учету и движению запасов, оплате труда и т.д.

Поэтому целью данных исследований было прогнозирование вероятных осадок земной поверхности под дорожным полотном и буровыми площадками, а в перспективе – обоснование плотности сети бурения контрольных скважин при определении величин осадок на Верхнечонском нефтегазоконденсатном месторождении исходя из требуемой точности получения конечного результата.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Выяснить закон распределения вертикальных оседаний для линейных (автомобильные дороги) и площадных (кустовые площадки) объектов.

2. Установить закономерности вертикальных осадок для автомобильных дорог и кустовых площадок с учетом технологии сооружения насыпей и особенностей движения автотранспорта в этот период.

3. Дать прогноз вертикальных оседаний на вновь сооружаемые кустовые площадки с целью расчета потребности в объемах песчано-гравийной смеси с учетом будущих осадок первичного рельефа.

4. Разработать теоретический алгоритм расчета реальных оседаний и определения фактических объемов уложенного грунта.

Количество анализируемых данных по автомобильным дорогам и кустовым площадкам составило соответственно 123 и 97 значений, то есть выборки можно считать представительными для статистической обработки. Исследования, выполненные по 14 линейным объектам и площадкам, показали, что распределение осадок может

удовлетворительно описываться нормальным законом (рис. 1) несмотря на некоторые заметные отличия.

В табл. 1 приведены параметры распределений, их ошибки и дополнительные характеристики оседаний после отсыпки автодорог и кустовых площадок. Сопоставление доверительных интервалов позволяет сделать вывод, что средняя величина оседания на дорогах и площадках имеет существенные отличия (доверительные интервалы не перекрываются). Как следствие, отличия имеются по медиане и моде (около 10%). Также эти объекты отличаются по изменчивости оседаний; при вероятности 95% доверительный интервал для коэффициента вариации составил: по автодорогам – 38,1–48,9%, по кустовым площадкам – 28,6–37,8%.

Оценка отличий асимметрии и эксцесса от нуля (то есть от нормального закона распределения вероятностей) выполнена в соответствии с общепринятой методикой, а именно по отношению их абсолютных величин к их ошибкам. Если данное отношение больше трех, то с вероятностью 0,997 отличие асимметрии или эксцесса от нуля следует признать существенным, а нулевую гипотезу о нормальном законе – отвергнуть.

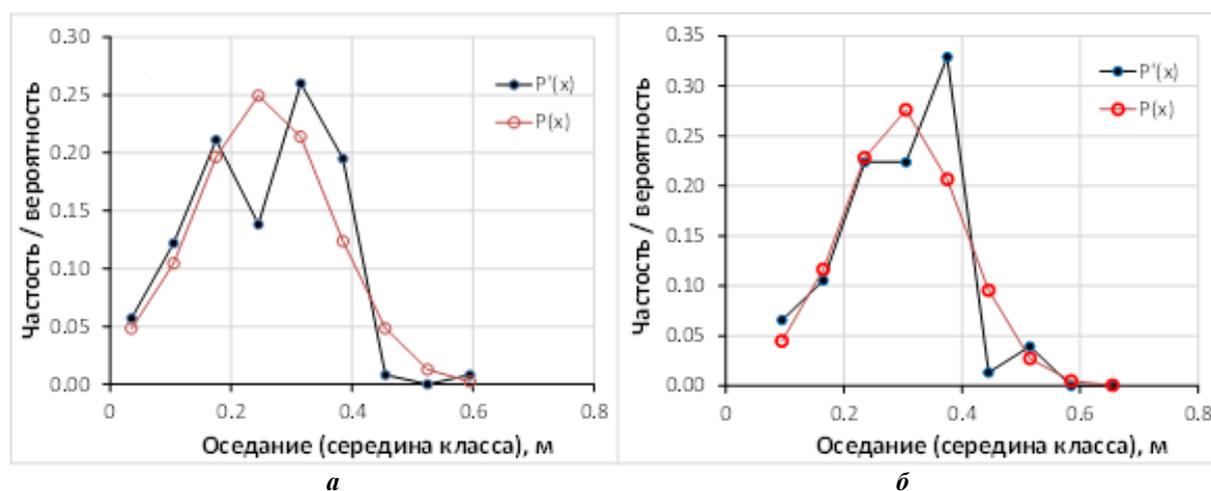


Рис. 1. Эмпирические кривые распределения оседаний земной поверхности под линейными объектами (а) и кустовыми площадками (б). $P'(x)$, $P(x)$ – соответственно эмпирическая относительная частота и вероятность

Таблица 1

Параметры распределения оседаний и их ошибки

Параметр распределения	Обозначение	Автодороги		Кустовые площадки	
		Значение	Погрешность параметра	Значение	Погрешность параметра
Максимальное оседание, м	X_{\max}	0,57	–	0,53	–
Минимальное оседание, м	X_{\min}	0,05	–	0,06	–
Объем выборки	N	123	–	76	–
Классовый промежуток, м	Δx	0,07	–	0,07	–
Среднее арифметическое	\bar{x}	0,25	0,01	0,30	0,01
Стандартное отклонение	σ	0,11	0,01	0,10	0,01
Коэффициент вариации, %	V	43,5	2,7	33,2	2,3
Коэффициент асимметрии	A	-0,3	0,22	-0,3	0,28
Коэффициент эксцесса	E	-0,4	0,44	-0,1	0,56
Медиана	Me	0,27	–	0,30	–
Мода	Mo	0,33	–	0,36	–

В рассматриваемом случае все отклонения меньше трех, таким образом, мы можем сделать предварительный вывод о том, что отличие эмпирического распределения оседаний от нормального закона несущественное.

Окончательный вывод сделан на основании строгой проверки с использованием статистического критерия Пирсона [2].

Критерий Пирсона χ^2 вычислен по формуле

$$\chi^2 = \sum_1^r \frac{(k-k_t)^2}{k},$$

где r – количество классов группировки.

При использовании этого критерия выборки не должны быть слишком малыми, то есть частота одного класса не должна быть меньше четырех значений. В распределениях (табл. 2) в последних классах частоты получились меньше, поэтому при расчетах выполнялось объединение двух и трех соседних классов (Л. Закс, 1976).

Таблица 2

Распределение оседаний на кустовых площадках

Классы x		Середина класса	Частота k'	Частота $P'(x)$	Эмпирическая функция распределения $F'(x)$	Функция распределения $F(x)$	Вероятность $P(x)$	Теоретическая частота k	Критерий Пирсона χ^2
Нижняя граница	Верхняя граница								
0,06	0,13	0,095	5	0,066	0,066	0,045	0,045	3,4	0,74
0,13	0,2	0,165	8	0,105	0,171	0,161	0,116	8,9	0,08
0,2	0,27	0,235	17	0,224	0,395	0,389	0,228	17,3	0,01
0,27	0,34	0,305	17	0,224	0,618	0,665	0,276	21,0	0,75
0,34	0,41	0,375	25	0,329	0,947	0,872	0,206	15,7	5,52
0,41	0,48	0,445	1	0,013	0,961	0,967	0,095	7,3	0,50
0,48	0,55	0,515	3	0,039	1,000	0,995	0,027	2,1	
0,55	0,62	0,585	0	0,000	1,000	0,999	0,005	0,4	
0,62	0,69	0,655	0	0,000	1,000	1,000	0,001	0,0	
			76	1,000					2,09

Наблюдаемые значения критерия Пирсона составили: для автомобильных дорог – 8,4, для кустовых площадок – 2,09. Критические точки Пирсона определены по таблицам [2] при степенях свободы $\nu = r - 3$ (r – количество классов) и уровне значимости $\alpha = 0,1$ (решение принимается с вероятностью 90%). Полученное критическое значение $\chi^2 = 11,34$ оказалось больше наблюдаемого. Таким образом, проверка гипотезы о нормальном законе распределения оседаний земной поверхности под воздействием кумулятивного воздействия нагрузок при помощи статистического критерия согласия Пирсона подтвердила ее, поэтому была принята гипотеза о нормальном законе распределения оседаний на автомобильных дорогах и кустовых площадках.

Точность определения величины оседания земной поверхности по данным бурения контрольных скважин выполнена на трассе кустовых площадок 25 – W6 от пикета 110+00 до пикета 224+00. На этом участке пройдены контрольные шурфы по пикетам, дополнительно перпендикулярно оси трассы в пределах проезжей части дорожного полотна пробурено по три скважины – одна по оси и две на обочине.

Построенные разрезы позволили уточнить механизм распределения оседаний в поперечном профиле под воздействием веса насыпи, вибромашин и работающих грузовых машин и оборудования. Максимальные осадки, как и следовало предполагать, возникают в области дорожного полотна и уменьшаются с приближением к нижней бровке основания насыпи.

Данные экспериментов позволили оценить среднеквадратическую ошибку определения мощности оседаний по данным бурения одной скважины. Ее средняя величина получена равной ± 5 см, однако она может быть завышена, поскольку не учитывает тенденции изменения мощности в поперечнике.

С этой целью по каждому поперечнику выполнен расчет случайной

ошибки на основе первых разностей (из-за малого числа данных в поперечнике) [1]:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Delta')^2}{2 \times k}},$$

где Δ' – первая разность, определяется как $\Delta' = x_i - x_{i+1}$; k – количество первых разностей.

Расчет показал, что принципиальной разницы в методах нет, величина случайной ошибки составила ± 5 см. Таким образом, вычисления, выполненные по данным экспериментальных работ, подтвердили предположение специалистов маркшейдерской службы, что погрешность одного замера мощности не превышает 5 см.

Рассмотрим особенности оседаний первичного рельефа при формировании кустовых площадок. Применяющаяся технология формирования кустовых площадок позволяет считать, что оседание подошвы насыпи происходит в основном под воздействием трех факторов: массы насыпного грунта, работы виброуплотнителя, движения грузового транспорта (нагруженного и порожнего).

Можно предположить, что из трех перечисленных факторов первый вызывает равномерное оседание только при сравнительно выдержанной мощности насыпи и избирательное при изменяющейся мощности, второй обеспечивает равномерное оседание вне зависимости от рельефа местности, а третий – избирательное оседание при многократном движении транспорта к местам разгрузки с последовательным увеличением дистанции относительно въезда на кустовую площадку. Безусловно, совершенно четкой функциональной связи здесь ожидать нельзя, поскольку на конечный результат – оседание – совместно действует множество других факторов, которые просто невозможно учесть. Однако корреляционная связь, возможно невысокая, должна существовать.

С этой целью выполнен обычный корреляционный анализ зависимости оседаний от мощности насыпи, оседаний

от расстояния транспортирования, а также рассчитаны множественные корреляционные связи и регрессионные модели.

Результаты расчетов показали, что зависимость оседаний земной поверхности от мощности насыпи для разных объектов меняется в довольно широком диапазоне – от незначительной до очень сильной.

С помощью обычного корреляционного анализа установлено, что на кустовых площадках процесс оседания под воздействием массы насыпи протекает разнонаправленно. На пяти объектах из девяти проявляется прямая зависимость разной силы – от слабой (кустовая площадка 86, коэффициент корреляции $R_{xy} = +0,16$) до почти функциональной (кустовая площадка W3, коэффициент корреляции $R_{xy} = +0,95$) (рис. 2). На четырех объектах отмечена более слабая, но противоположного действия зависимость.

Как видим, процесс оседания исходной поверхности при формировании насыпей разной высоты имеет сложный характер. На данном этапе не представляется возможным объяснить причину такого поведения осадок, поскольку наиболее вероятный исход – это увеличение оседаний под воздействием веса насыпи, работы вибромашин и движения автотранспорта. Возможно, на геомеханический процесс оседаний влияет многолетняя мерзлота, носящая на месторождении островной характер, или вы-

ходы коренных пород, искажающие общую картину деформирования почвенного слоя и суглинков по площади, или разный характер оседаний в случае отсыпки грунта на наклонную первичную поверхность с последующим виброуплотнением насыпного грунта.

Об этом свидетельствует график изменения зависимости коэффициентов корреляции «высота насыпи – мощность осадки», где при мощности насыпи до 2,8–3,2 м корреляция обратная, а при больших значениях мощности зависимость меняется на прямую и довольно сильную (рис. 3).

В целом эту зависимость можно аппроксимировать как линейной функцией (обозначена пунктиром) с достаточной степенью точности аппроксимации, так и нелинейной – параболической. Скорее всего, процесс оседания носит нелинейный характер, поскольку анализируемое оседание является так называемым постфактумом – конечным продуктом, на который оказало влияние виброуплотнение грунта, работа автотранспорта и ряд других в разной степени влияющих факторов.

Связь величины оседания с предполагаемым расстоянием транспортировки просматривается, но она выражена значительно слабее (профили для анализа выбраны от въезда по направлению длинной стороны площадки). Значения коэффициентов корреляции между оседанием и расстоянием

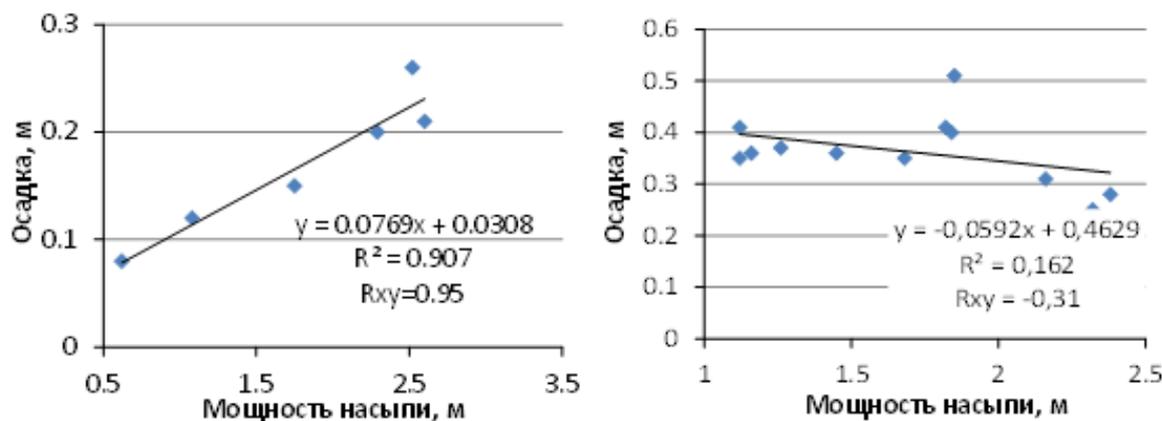


Рис. 2. Зависимость оседаний от мощности насыпного грунта

транспортировки от въезда на кустовую площадку находятся в основном в диапазоне от $\pm 0,14$ до $-0,26$; имеется только один случай, когда корреляция достигла величины $-0,51$ (рис. 4). Основная тенденция – это уменьшение величины осадок по мере увеличения расстояния от места въезда на площадку до места разгрузки. С практической точки зрения понятно, что наибольшие деформирующие нагрузки приходятся на зону, прилегающую к въезду на площадку, вследствие большей интенсивности движения автотранспорта и уменьшаются по мере удаления к краевым частым кустовым площадкам. Это подтверждает и знак «минус» коэффициентов корреляции.

Подчеркнем, что больших значений коэффициентов корреляции и не следовало ожидать, поскольку отмеченная закономерность заглушается работой вибромашин, то есть, как уже

Нелинейное взаимодействие величины осадки с расстоянием транспортирования и мощностью насыпи изучено с применением множественных полиномиальных функций. Расчеты показали, что лучшая аппроксимация достигается функцией второго порядка, графическое

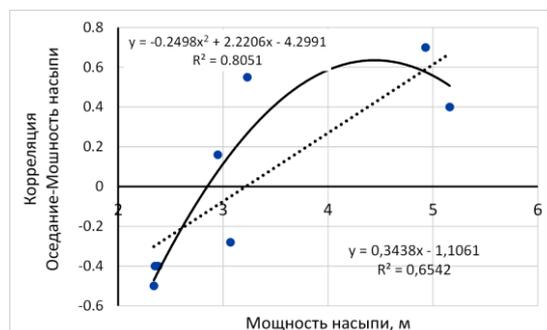


Рис. 3. Разный характер оседаний земной поверхности под кумулятивным действием деформирующих факторов

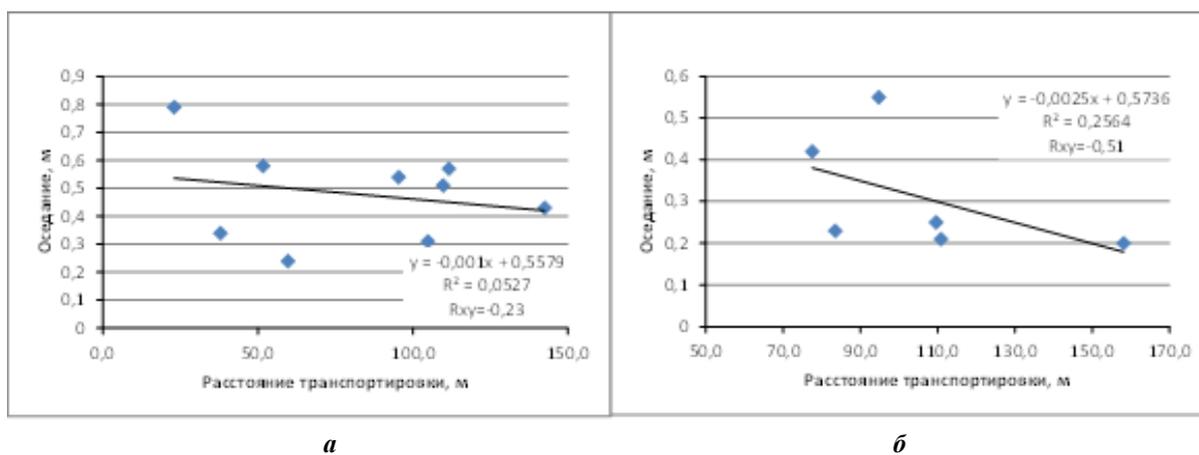


Рис. 4. Зависимость оседаний от расстояния транспортировки на кустовых площадках W7 (а) и P2 (б)

было отмечено, оседание является интегральной величиной разнонаправленного воздействия многих факторов.

Для оценки совместного действия массы насыпи и расстояния транспортировки породы транспортом на оседание просчитана множественная линейная корреляция (табл. 3).

Как видим, в трех случаях из девяти отмечается существенная линейная связь, в четырех зависимость имеет пограничный характер, и только в двух невысокая.

представление которой дано на рис. 5:

$$Z(X, Y) = A_{00} + A_{01}Y + A_{02}Y^2 + A_{10}X + A_{11}XY + A_{20}X^2,$$

где $Z(X, Y)$ – оседание, м; X – расстояние транспортировки (длина вектора от въезда до точки разгрузки на площадке), м; Y – мощность насыпи, м; $A_{00}, A_{01}, A_{02}, A_{10}, A_{11}, A_{20}$ – коэффициенты, найденные по способу наименьших квадратов и равные соответственно $0,29201837$; $-0,019497333$; $0,004190365$; $0,012824794$; $0,007962567$; $0,00903811$.

Таблица 3

Коэффициенты множественной корреляции по кустовым площадкам

Объект	Кустовая площадка								
	19	49	56	62	70	86	W3	W7	P2
Коэффициент множественной корреляции	0,39	0,45	0,71	0,36	0,46	0,04	0,24	0,54	0,89

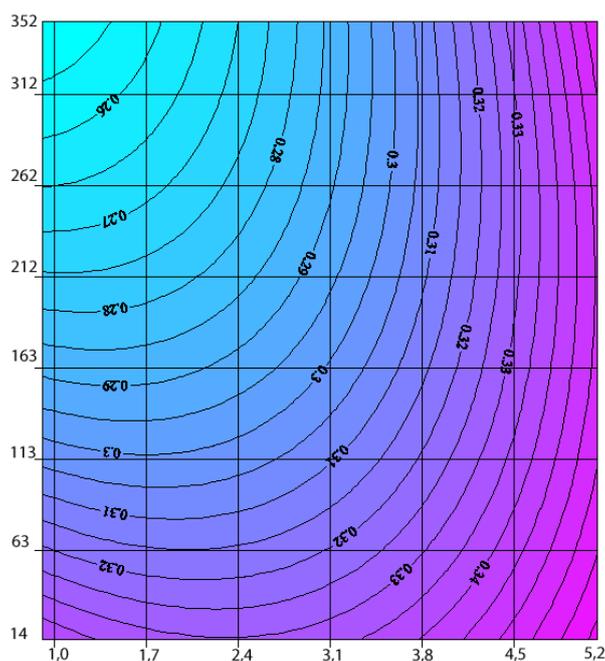


Рис. 5. Зависимость оседаний от расстояния транспортировки (вертикальная ось) и мощности насыпи (горизонтальная ось)

Величина свободного члена A_{00} , равного 0,29201837, свидетельствует о том, что два фактора – расстояние и мощность – не в полной мере описывают процесс оседания, поскольку не учтено влияние других факторов, например работы вибромашин, рельефа местности и других. Поэтому точность достигнутой аппроксимации составляет ± 11 см, то есть вдвое больше технической ошибки определения границы подошвы насыпи.

Тем не менее найденная зависимость может быть применена для прогноза вероятных оседаний при отсыпке кустовых площадок в их различных частях и планирования ожидаемых дополнительных объемов грунта для компенсации оседаний земной поверхности при формировании буровой площадки.

Кроме этого, полученная диаграмма может служить ориентиром при ведении буровых работ по определению границ контакта «земля – подошва насыпи».

В принципе, полученная диаграмма позволяет подсчитывать объемы просадок, не прибегая к контрольному бурению. Однако данный вопрос требует дополнительного изучения.

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Оседания земной поверхности под насыпными сооружениями инициированы многочисленными факторами, среди которых – особенности рельефа и геологической среды поверхностной части, высота насыпи, движение грузового транспорта, работа вибромашин и другие.

2. Точность определения границы «насыпь – земля» по принятой технологии производства работ составляет ± 5 см, что само по себе не позволяет получить среднее оседание с меньшей ошибкой.

3. Наличие корреляционной связи оседаний с высотой насыпи и расстоянием транспортирования горной породы от въезда на кустовую площадку до точки разгрузки позволяет создать прогнозную функцию оседаний под воздействием указанных факторов.

4. Прогнозная функция представлена аналитически в виде множественной регрессионной модели второго порядка и номограммы. Модель позволяет с точностью ± 11 см прогнозировать развитие деформаций земной поверхности на площади отсыпки будущей кустовой площадки.

5. Использование найденной зависимости дает возможность на стадии проектирования планировать дополнительно требующиеся объемы горных пород, их запасы, что способствует более точному расчету предстоящих затрат по формированию дорожной инфраструктуры и кустовых площадок для буровых работ.

Библиографический список

1. Букринский В.А. Геометрия недр. М.: Недра, 1985. 561 с.
2. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 599 с.

Статья поступила 16.10.2015 г.