

УДК 624.131

**Мокрицкая Т. П.**, канд. геологич. наук, доцент  
Днепропетровский нац. университет им. Олесь Гончара,  
кафедра геологии и гидрогеологии  
пр. Гагарина, 72, Днепропетровск-50, 49050, Украина,  
mokritska@i.ua

## **НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНИВАНИЯ СВОЙСТВ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ МНОЖЕСТВА ИСТОЧНИКОВ**

Обработаны результаты инженерно-геологических изысканий (2004 г.) в центральной части г. Днепропетровска. Анализ показал закономерное повышение влажности и плотности к кровле водоупорного слоя. Погрешность оценки нормативных показателей асимметричных распределений превышает допустимый уровень. Критерием устойчивости состояния грунтов в зоне влияния множества источников может быть постоянство вида трендовой и периодической составляющих модели свойств как взаимосвязанных пространственных переменных.

**Ключевые слова:** грунты, свойства, модели, пространственные переменные; критерии устойчивости, оценки, тренды.

### **Введение**

Требования о статистической однородности свойств инженерно-геологических элементов, по нормативу [1], регламентирующему обработку материалов изысканий, не содержат указаний о необходимости проверки закона распределения регистрируемых в процессе физических экспериментов показателей. В качестве статистической модели принята модель случайной величины. Важнейшей характеристикой случайной величины является закон распределения, характеризующий «распределение значений случайной величины по вероятности их появления» [2]. Если распределение не является симметричным, параметром является оценка медианы, а не среднего. Основная цель данной статьи — оценить инженерно-геологические свойства просадочных грунтов в зоне влияния

© Мокрицкая Т. П.

множества выходов на поверхность подземных вод на территории большого города.

Применение корреляционного и регрессионного анализа к описанию взаимосвязей между показателями физических и физико-механических свойств базируется на экспериментально установленных зависимостях, общеизвестных связях между свойствами грунта, его состоянием и генезисом. Распространены модели, оперирующие расчетными показателями, полученными в результате преобразования экспериментально определенных величин. В условиях интенсивных многолетних техногенных воздействий изменение свойств сопровождается изменением структурно-текстурных особенностей, физического состояния, гранулометрического состава. В нормативах не учитывается возможность изменения характера связей между показателями физических свойств, действующих на момент изысканий и в будущем. Все это указывает на актуальность данной темы работы.

Множественные регрессионные уравнения, построенные по методу наименьших квадратов, применяются как прогнозные зависимости, связывающие физические и физико-механические характеристики грунта при соблюдении предпосылок Гаусса-Маркова [3] о случайности и гомоскопичности ошибок. Признаком гомоскопичности, приводящей к устойчивости коэффициентов регрессии, является отсутствие автокорреляции остаточных значений. В зависимостях, описывающих связи между показателями в пространственных координатах, автокорреляция является признаком наличия периодичности, коррелированности значений в границах единого по стратиграфо-генетическим признаком геологического тела – грунта, инженерно-геологического элемента. Отсюда следует теоретическая значимость данной работы.

### **Фактический материал и методика исследования**

Обработаны результаты инженерно-геологических изысканий, выполненных в 2004 г. в центральной части г. Днепропетровска. В сфере взаимодействия на изученную глубину 26,0 м входят отложения плейстоцена: причерноморско-дофиновский, бугский, днепровский и мартоношский горизонты. Эти отложения представлены суглинками, супесями. Тип грунтовых условий по просадочности определен как первый. Выполненная в соответствии с требованиями нормативов статистическая

обработка материалов изысканий подтверждала правильность выделения инженерно-геологических элементов, так как коэффициент вариации показателей не превысил предельно допустимые значения, все частные значения показатели вошли в выборочную совокупность. Залегание выдержанное, незначительное повышение кровли мартоношского горизонта сопровождается уменьшением мощности днепровского горизонта. Уровень грунтовых вод находился на глубинах 10,5–10,4 м. Подъем уровня составил 5,3 м за 35 лет (с 1969 г.). Территория застроена одноэтажными и многоэтажными строениями, относится к историческому центру большого города. Камеральная обработка выполнялась по стандартной методике [1, 5].

### **Изложение основного материала**

Анализ распределения по разрезу средних значений показателей физических свойств показал, что к кровле относительного водоупорного слоя (мартоношский климатолит) закономерно повышалась влажность и плотность грунтов. Неоднородности плотности частиц мартоношского и вышележащих лессовых горизонтов отражались в большей степени на значениях верхнего предела пластичности (рис. 1).

Проверка нормального закона распределения показала, что нормальный закон распределения плотности соблюдается с большей вероятностью в распределениях свойств лессовых горизонтов, влажности – в границах бугского горизонта, пределов пластичности – мартоношского (табл. 1). Относительная погрешность обеспечивается в оценках нормативных значений свойств распределений, которые не соответствуют нормальному закону (влажность природная, причерноморский горизонт), и обычно составляет больше 5 % (табл. 2) из-за оценок средних, а не медианных значений асимметричных распределений. Корреляционный анализ (расчет рангового коэффициента корреляции Спирмена) показал, что значения физических свойств стратиграфо-генетических горизонтов, находящихся в зоне влияния множества рассредоточенных источников (причерноморско-дофиновский и бугский горизонты), залегающих выше уровня грунтовых вод, не зависят как друг от друга, так и от глубины отбора. Значимый коэффициент корреляции был получен между плотностью бугского горизонта и глубиной отбора, но уравнение регрессии незначимо по критерию Фишера.

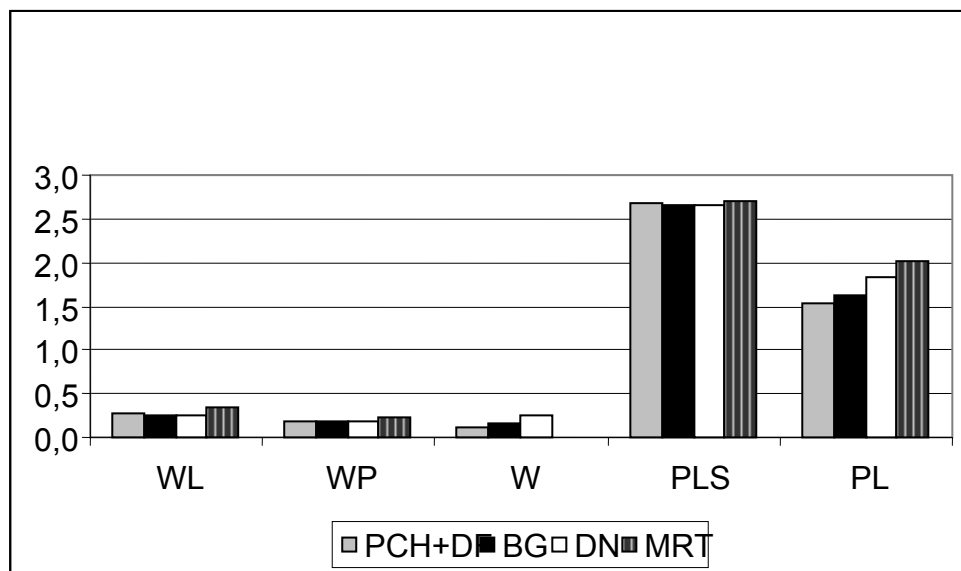


Рис.1. Средние значения показателей физических свойств горизонтов (2004 г.)

Условные обозначения:

1. Показатели свойств грунта: WL, WP — **верхний и нижний предел пластичности**, д.ед.; W — природная влажность, д. ед.; PLS — плотность частиц грунта, г/см<sup>3</sup>; PL — плотность грунта, г/см<sup>3</sup>.
2. Индексы горизонтов: PCH+DF — причерноморско-дофиновские отложения *vd,edIIIpch,df*; BG — бугский лессовый горизонт *edIIIbg*; DN — днепровский лессовый горизонт *vdIIIdn*; MRT — мартоношский палеопочвенный горизонт *edImr*.

Для водовмещающего днепровского горизонта характерно закономерное распределение влажности по глубине, влияющее на верхний предел пластичности (табл. 3). Уравнение регрессии (табл. 3) рассчитано по переменным, приведенным к стандартному виду, как и все последующие. Применен метод пошагового включения переменных. Регрессионный анализ свойств мартоношского горизонта выражает связь между пределами пластичности и глубиной (табл. 4).

Корреляционный анализ свойств объединенной выборочной совокупности показателей свойств грунтов, относящихся к одной формации, показал закономерное распределение по глубине. Наиболее тесная связь устанавливается для показателей плотности и влажности, в меньшей

степени — пределов пластичности (табл. 5). Регрессионный анализ подтвердил закономерность в распределении влажности по разрезу (табл. 6), связь со значениями плотности и плотности частиц. Более информативной оказалась обратная зависимость плотности от влажности и глубины. В этом случае в уравнение включается глубина отбора, что позволяет получить модель пространственной геологической комплексной переменной, связывающей важнейшие характеристики с координатой. Автокорреляция остаточных значений отсутствует в обоих уравнениях.

Таблица 1

**Проверка нормального закона распределения показателей физических свойств**

Горизонт	Показатель	Критерий Колмогорова-Смирнова		Lilliefors	Shapiro-Wilk	
		K-S d	p	p	W	p
PCH	PL	0.218	>0.2	>0.2	0.87	0.187
BG	WL	0.33	>0.2	<0.05	0.827	0.101
	W	0.223	>0.2	<0.01	0.908	0.42
	PL	0.231	>0.2	>0.2	0.915	0.473
DN	PL	0.267	>0.2	<0.15	0.893	0.294
MRT	WL	0.214	>0.2	>0.2	0.958	0.804
	WP	0.183	>0.2	>0.2	0.96	0.82

Примечание к табл. 1-11:

1. Переменные: Z — глубина, м; WL, WP — верхний и нижний пределы пластичности, д.ед.; W — природная влажность, д.ед.; PLS — плотность частиц грунта, г/см<sup>3</sup>;
2. PL — плотность грунта, г/см<sup>3</sup>.
3. См. примечание 2 рис.1.
4. Статистические показатели: K-S d — критерий Колмогорова — Смирнова; Lilliefors — поправка Лиллефорса; Shapiro-Wilk — статистики Шапиро — Уилкса.

Проверка на выполнимость нормального закона величин абсолютной деформации одного стратиграфо-генетического горизонта в состоянии естественной влажности и полного водонасыщения показала, что разброс показателей деформационных свойств просадочных грунтов в зоне аэрации застроенной территории существенен и различен на разных ступенях давления.

Таблица 2

**Относительные погрешности, д.ед., оценок нормативных значений физических свойств**

Показатель	Горизонт			
	MRT	DN	BG	PCN
WL		-0,012		-0,015
WP		0,016		-0,021
W		0,017		0,055
PLS	0,001	0,001	0,013	
PL	0,001			

Примечание к табл. 2: см. прим. 1, 2 табл. 1.

Таблица 3

**Регрессионный анализ зависимости влажности днепровского горизонта от глубины**

	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(5)	p-level	R	R <sup>2</sup>	F(1,5)	p
Z	0,862	0,227	0,862	0,227	3,795	0,013	0,86	0,74	14,4	<0,01
W = 0.862Z										

Примечание к табл. 3 и 6: Beta — коэффициент; Std. Err. — стандартная ошибка; R — коэффициент множественной корреляции; R<sup>2</sup> — коэффициент детерминации; F — критерий Фишера; p — достигнутая вероятность.

Таблица 4

**Зависимость между пределами пластичности, глубиной отбора мартоношского горизонта**

	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(3)	p-level	R	R <sup>2</sup>	F(1,5)	p
Z	0,276	0,077	0,276	0,077	3,573	0,037	0,995	0,989	139,43	<0,02
WL	0,796	0,077	0,796	0,077	10,308	0,002				
WP = 0.276Z + 0.796WL										

Примечание: Уравнение регрессии рассчитано по значениям переменных, приведенным к стандартному виду.

При ступени давления 0,05 МПа соответствие нормальному закону маловероятно (табл. 7). Значения коэффициента вариации абсолютных деформаций, превышающие предельно допустимое значение 30% [1], соответствуют давлению 0,05 МПа (для бугского и мартоношского горизонтов) и 0,25 МПа (для причерноморско-дофиновского горизонта).

Таблица 5

**Значения рангового коэффициента корреляции Спирмена свойств лессовой формации**

	Z	WL	WP	W	PLS	PL
Z	1	0,439	0,743	0,818		0,949
WL	0,439	1	0,506		0,86	0,4
WP	0,743	0,506	1	0,457		0,775
W	0,818		0,457	1	-0,48	0,845
PLS		0,86		-0,48	1	
PL	0,949	0,4	0,775	0,845		1

Примечание: в таблице приведены значимые коэффициенты корреляции, вероятность ошибки составляет менее 0,05.

Таблица 6  
**Результаты регрессионного анализа свойств объединенной выборки**

	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(18)	p-level	R	R <sup>2</sup>	F(1,5)	p
W=46.4+6.585PL-21.661PLS-0.412WP										
Intercept			46,4	12,868	3,606	0,002				
PL	1,145	0,096	6,585	0,553	11,907	0				
PLS	-0,391	0,085	-21,661	4,736	-4,574	0				
WP	-0,364	0,115	-0,412	0,13	-3,175	0,005	0,959	0,919	68,513	<0,0
PL=1.729+0.113Z+0.075W										
Intercept			1,729	0,009	200,422	0,000				
Z	0,586	0,127	0,113	0,025	4,606	0,000				
W	0,432	0,070	0,075	0,012	6,167	0,000	0,979	0,958	135,47	<0.05

Как результат, разброс значений модуля деформации бугского и мартоношского горизонтов превышает допустимое значение на начальной ступени давления и в интервале давлений 0,3-0,4 МПа (табл. 8). Нормальный закон не выполняется в распределении значений модуля деформации водовмещающего днепровского горизонта. Относительная погрешность, как результат принятия в качестве нормативного значения модуля деформации мартоношского горизонта среднего, а не медианного значения (в интервале давлений 0,3–0,4 МПа) составила 29%.

Проверка на выполнимость нормального закона показала, что приведенные к стандартному виду значения абсолютных деформаций грунтов объединенной выборочной совокупности, определенные в состо-



янии полного водонасыщения, во всем интервале давлений подчиняются нормальному закону (табл. 9).

Деформационное поведение в состоянии природной влажности подчиняется нормальному закону для всех грунтов при давлении 0,05 МПа. Выполняется нормальный закон распределения модуля деформаций в интервале давлений 0,1–0,2 МПа, коэффициента относительной просадочности при давлении, близком к природному.

Таблица 7

**Выборочные результаты проверки на выполнимость нормального закона распределения свойств отдельных горизонтов**

Горизонт	Показатель	Критерий Колмогорова-Смирнова		Поправка Лиллефорса	Критерий Шапиро-Уилкса	
		K-S d	p	Lilliefors p	W	p
PCH	DEFSAT 0,05	0,253	>0,2	<0,2	0,817	0,06
	DEFSAT 0,2	0,37	>0,2	<0,1	0,789	0,031
	ESL 0,2	0,29	>0,2	<0,1	0,773	0,022
	ESL 0,3	0,26	>0,2	<0,15	0,813	0,055
BG	DEFSAT 0,05	0,489	<0,1	<0,1	0,501	0
	ESL 0,1	0,333	>0,2	<0,05	0,72	0,01
DN	E 0,1-0,2	0,352	>0,2	<0,05	0,786	0,044
	E 0,2-0,3	0,343	>0,2	<0,05	0,825	0,098
	E 0,3-0,4	0,325	>0,2	<0,05	0,779	0,038

Примечания: 1. DEFSAT 0,05 — абсолютная деформация образца в состоянии полного водонасыщения при давлении 0,05 МПа; ESL 0,1 — коэффициент относительной просадочности, определенный по методу двух кривых при давлении 0,1 МПа; E 0,1-0,2 — модуль деформации, определенный в интервале давлений 0,1-0,2 МПа. 2. См. прим. табл. 1.

Таблица 8

**Статистики асимметричных распределений показателей деформационных свойств отдельных горизонтов**

Горизонт	Показатель	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации	Асимметрия	Экссесс
PCH +DF	DEF 0,25	1,551	1,500	0,880	2,620	0,616	39,714	0,708	0,147
	ESL 0,05	0,004	0,003	0,001	0,01	0,003	89,485	1,371	1,779
	ESLPZ	0,004	0,005	0	0,007	0,003	70,711	-0,716	-1,481
BG	E 0,1-0,2	7,282	7,08	0,76	13,89	4,306	59,131	0,046	1,345
MRT	DEF 0,05	0,242	0,265	0,1	0,32	0,081	33,557	-1,226	1,149
	E 0,3-0,4	22,233	17,265	14,71	41,67	10,694	48,1	1,571	1,853

Значения коэффициента вариации выборочных совокупностей показателей, приведенных к стандартному виду, меньше предельно допустимых для абсолютных деформаций при давлении 0,05 МПа; абсолютных деформаций, определенных в состоянии полного водонасыщения при давлении 0,25 МПа и значений бытового напряжения на глубине отбора. Учитывая результаты первичного статистического анализа, результаты проверки с применением критериев, применимых для случая малых выборок [3], можно сделать вывод о выполнимости нормального закона в двух различных состояниях: слабой и сильной нарушенности структуры грунта. Природные напряжения изменялись от 0,027 до 0,11 МПа. Теоретические предположения о наличии «особых» ступеней давления, при которых скачкообразно изменяется состояние, представлены в работе [4]. Регрессионные соотношения между физическими и механическими характеристиками объединенной выборочной совокупности при ступенях нормального давления 0,05 и 0,25 МПа получены не были.

Таблица 9

**Выборочные результаты проверки на выполнимость нормального закона распределения результатов компрессии (объединенная совокупность)**

Показатель	Критерии				
	Колмогорова-Смирнова		Поправка Лиллефорса	Шапиро-Уилкса	
	K-S d	p	Lilliefors p	W	p
DEF 0,05	0,142	>0,2	>0,2	0,962	0,597
DEFSAT	0,16	>0,2	>0,2	0,945	0,53
DEFSAT 0,05	0,124	>0,2	>0,2	0,933	0,378
DEFSAT 0,3	0,195	>0,2	>0,2	0,934	0,38
ESL 0,05	0,173	>0,2	>0,2	0,9	0,131
ESL 0,2	0,168	>0,2	>0,2	0,944	0,511
E 0,1-0,2	0,247	>0,2	<0,1	0,918	0,102

Получены регрессионные уравнения, связывающие физические и физико-механические свойства грунтов при давлениях 0,1 и 0,3 МПа (состояние естественной влажности) и при давлении 0,2 МПа (состояние полного водонасыщения) двух видов: с наличием и отсутствием автокорреляции остаточных значений (табл. 10).

В этих уравнениях подтверждается связь между величиной деформации, влажностью и плотностью частиц на уровне формации, зависимость плотности и влажности от глубины отбора подтверждена на более высоком таксономическом уровне (см. табл. 7). Автокорреляция остаточных значений описывается моделями ARIMA (1,0,0) и (0,0,0)(1,0,2) (табл. 11) в интервале давлений, меньших природных. Применимость прогнозного уравнения должна ограничиваться временем, на протяжении которого вид модели связи между физическими и механическими характеристиками на характерных ступенях не изменяется. В этом случае учитываются новые данные о закономерностях деформирования грунтов, в отличие от распространенного упрощенного подхода [5].

Таблица 10  
**Результаты множественного регрессионного анализа показателей деформационных свойств формации (по объединенной выборке)**

	Beta	Std.E. Beta	B	Std.E. of B	t(9)	p-level	R	R <sup>2</sup>	F(1,5)	p
DEF 0.1* = -178.228 + 2.269W + 74.742PLS										
Intercept			-178,228	73,445	-2,427	0,038				
W	0,995	0,431	2,269	0,982	2,31	0,046				
PLS	1,384	0,49	74,742	26,436	2,827	0,02	0,86	0,739	5,103	<0,02
DEF 0.3=62.481PLS										
PLS	1,273	0,559	62,481	27,458	2,275	0,049	0,812	0,659	3,487	<0,05
DEFSAT 0.2*=0.496WP										
WP	-0,476	0,191	-1,239	0,496	-2,495	0,041	0,918	0,844	7,592	<0,05

Условные обозначения: DEF\* — автокорреляция остаточных значений уравнения регрессии присутствует.

### Выводы

Изложенные материалы наших исследований, их анализ и научная интерпретация позволяют сделать следующие выводы.

- Оценка нормативных показателей по средним значениям асимметричных выборочных распределений может быть причиной погрешностей, превышающих допустимый уровень.
- Выбор модели пространственной переменной, по сравнению с моделью случайной величины, позволяет существенно снизить погрешности в оценивании свойств.
- Критерием устойчивости состояния грунтов, относящихся к одной формации и находящихся в зоне влияния множества источников,

может быть постоянство вида трендовой и периодической составляющих модели пространственной переменной.

- Модель должна отражать связи между физическими и механическими (определенными при давлениях, близких к природным) характеристиками и координатой.

Таблица 11

**Параметры моделей авторегрессии остаточных значений**

Уравнение регрессии: DEF0.1* = -178.228 + 2.269 W + 74.742PLS RESIDUAL: DEF 0.1-0,0092 + 0,0025*t						
Model	MS Residual	Param.		Asym. Std.Err.	Asym. t( 18)	p
(1,0,0)	0,125	p(1)	-0,746	0,161	-4,625	0
Уравнение регрессии: DEFSAT 0.2* = 0.496WP RESIDUAL: DEFSAT 0.2-,013-,001*t						
(0,0,0) (1,0,2)	0,163	Ps(1)	-0,705	0,224	-3,149	0,007
		Qs(1)	-0,56	0	-2,9E+11	0
		Qs(2)	0,44	0	2,88E+11	0

Условные обозначения: 1. Residual — остаточные значения; Param. — параметр авторегрессии; MS Residual — средний квадрат остаточных ошибок модели; Asym.Std.Err. — стандартная ошибка параметра авторегрессии; p — вероятность.

**Список использованной литературы**

1. *ГОСТ 20522-96*. Межгосударственный стандарт // ГРУНТЫ: Методы статистической обработки результатов испытаний. — Введ.1997-01-01. — М: ИПК Изд-во стандартов, 1997.
2. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика, Для инженеров и научных работников. — Москва: Физматлит, 2006. — 816 с.
3. *Бородич С. А.* Вводный курс эконометрии. — Минск: Изд-во БелГУ, 2000. — 354 с.
4. *Ляшенко П. А.* Модель деформации микроструктуры грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал

Кубанского аграрного университета. — Краснодар: КубГАУ / 2005. — № 14. — С. 12–26.

5. *Присс О. Г.* Определение степени устойчивости глинистых грунтов с помощью показателей влажности // Современные проблемы науки и образования. — 2009. — № 3. — С. 109–111.

Статья поступила в редакцию 11.09.2012

**Мокрицька Т. П.** Дніпропетровський національний університет ім. Олесея Гончара,  
Кафедра геології і гідрогеології  
пр. Гагаріна, 72, Дніпропетровськ, 49050, Україна  
e-mail: mokritska@i.ua

*Резюме*

Опрацьовані результати інженерно-геологічних вишукувань (2004 р.) у центральній частині м. Дніпропетровська. Присутнє закономірне підвищення вологості і щільності з глибиною, до покрівлі водотривкого горизонту. Похибка оцінки нормативних показників асиметричних розподілів перевищує допустиму. Критерієм стійкості стану ґрунтів у зоні впливу безлічі джерел може бути сталість виду трендової та періодичної складових моделі властивостей, що є взаємопов'язаними просторовими змінними.

**Ключові слова:** властивості ґрунтів; моделі; просторові змінні; критерії стійкості.

**Mokritska T. P.**  
Dnepropetrovsk National University,  
Department of Geology and Hydrogeology,  
Gagarin Str. 72, Dnepropetrovsk-50, 49050,  
Ukraine  
e-mail: mokritska@i.ua

*Abstract*

There are results of engineering-geological surveys (2004) in the central part of Dnepropetrovsk. The analysis showed regular increase moisture content and density to the roof impervious layer. Assessments of normative parameters into asymmetric distributions are exceeding the permissible

level. The criterion for the stability of the soils in the zone of influence of a variety of sources can be kind of permanence trend and periodic components of the model properties as related spatial variables.

**Key words:** soil properties, models, spatial variables, the stability criteria.