

Т. П. Мокрицкая

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ ЛЕССОВОГО МАССИВА
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА***(Рекомендовано акад. НАН Украины В. М. Шестопаловым)*

Наведені результати досліджень часових рядів мінливості властивостей геологічного середовища як підсистеми природно-техногенної системи локального рівня на прикладі м. Дніпропетровськ за період 1964–2007 рр.

The article contains results time-series studies of variability properties of the geological environment as a sub-system of natural and industrial systems on the local level is an example of Dnepropetrovsk in the period 1964–2007 years.

Анализ изученности проблемы

Методы анализа и прогноза временной изменчивости свойств геологической среды в результате функционирования природно-технических систем являются предметом исследований с момента становления инженерной геологии как науки. Прогноз поведения среды при механических воздействиях выполняется на основании сочетания методов физического и математического моделирования, геологических и инженерно-геологических методов исследований [5]. О необходимости дальнейшего изучения изменений свойств грунтов на разных уровнях организации геологической среды и природно-техногенных систем можно судить по материалам международных конгрессов, конференций [8, 10], монографий [9]. На территории Нижнеднепровского промышленного региона широко распространены перигляциальные лессовые и лессовидные плейстоценовые отложения, которые по особенностям поведения относятся к структурно-неустойчивым, специфическим.

Фактический материал

В настоящей работе изучены временные закономерности изменчивости свойств перигляциальных субаквальных и субаэральных отложений на территории г. Днепропетровск, слагающих зону влияния природно-техногенной системы локального уровня. Фактический материал представляет собой

результаты инженерно-геологических исследований, выполненных в 1964–2007 гг. для проектирования объектов промышленно-гражданского назначения проектно-изыскательским институтом "ДнепроГИИТИЗ". Данные о свойствах грунтов были представлены в виде базы данных, общее количество записей (строк) составило 2922. Поля каждой записи включают результаты прямых экспериментальных определений показателей физических и механических свойств грунтов: влажности, плотности, плотности частиц, содержания фракций, относительных деформаций при компрессионных испытаниях, относительных деформаций при испытаниях на срез, просадочности. Координатная привязка выполнена в условной системе, каждая запись датируется годом отбора, задается глубина и абсолютная отметка отбора, положение уровня подземных вод.

Постановка задачи

Из анализа компонентов инженерно-геологических условий, выполненного по фондовым материалам геологических, гидрогеологических, мелиоративных и инженерно-геологических съемочных работ, видно, что состав геологической среды (изучена до глубины 42,0 м) сложный. В разрезе присутствуют дисперсные перигляциальные отложения, подстилаемые эоплейстоценовыми, неогеновыми, палеогеновыми глинами и песками, залегающими на коре выветривания архей-протерозойских гранитов. Верхнеплейстоценовые отложения представлены нерасчлененными причерноморско-дофиновскими

© Т. П. Мокрицкая, 2013

ed, vdlllpc+df; бугскими **vdlllbg**; прилукскими **edlllpl**; нерасчлененными витачевскими и прилукскими **edlllvt+pl**; делювиальными нерасчлененными ниже-среднеплейстоценовыми отложениями **dll-III**; удайскими **vdlllud** и витачевскими **edlllv**; делювиальными суглинками **dlll**. Среднеплейстоценовые отложения представлены климатолитами: днепровским **vd+dllldn, vdllldn, edllldn** и тясминским **vdlllts**; кайдакским **edlllkd** и завадовским **edllz**. Нижнеплейстоценовые отложения включают мартоношский **dllmr**, лубенский **edllb**, тилигульский **vdlltj**, приазовский **dPIpr** горизонты и делювиальные, элювиально-делювиальные отложения **dPI, edPI**. Условия залегания, выдержанность разреза, обводненность массива связаны с особенностями палеогеоморфологической структуры, современными ландшафтно-климатическими условиями и техногенными воздействиями. Выделение таксонов инженерно-геологического районирования на картах [2, 7] было выполнено по геоморфологическим признакам. На протяжении 1964–2007 гг. происходило развитие городской инфраструктуры, изменялись площадь и плотность застроенных территорий, интенсивность техногенных воздействий гидродинамического и механического классов. При относительно незначительной интенсивности техногенных воздействий общие региональные закономерности изменчивости свойств лессовидных грунтов на глубину активной зоны подчинялись геоморфологической зональности [3]. В результате возрастания, стабилизации и уменьшения интенсивности комплексных техногенных воздействий следует ожидать изменений грунтов в границах области влияния природно-техногенной системы локального уровня.

Настоящая работа посвящена выяснению аспектов и закономерностей изменчивости свойств грунтов под действием комплексных нестационарных техногенных воздействий по результатам изучения нерегулярных временных рядов определения показателей физических и механических свойств.

Методы исследований

Анализ неоднородных и нерегулярных данных требует привлечения современных методов для решения задач классификации.

Неоднородность данных о свойствах объясняется сложностью палеогеографических и современных условий, определяющих состояние грунтов и массива. Для изучения связи тенденций изменчивости и уровня однородности объекта выборочная совокупность последовательно делилась на части по следующим признакам: принадлежности к отделам плейстоцена, климатическим эпохам, времени определения, состоянию по влажности. В последнем случае совокупность данных о свойствах субэкральных отложений была разбита на части по таким критериям: консистенция грунта и способ отбора (монолит или проба нарушенной структуры). Результаты определения свойств грунтов по пробам с нарушенной структурой при консистенции больше 0,5, которые, по данным документирования, находились в зоне полного водонасыщения и результаты определения свойств по монолитам, характеризующим состояние грунтов зоны аэрации, отнесены к разным выборкам на всех уровнях изучения. При выполнении статистической обработки материалов использовано ПО STATIST (ДНУ им. О. Гончара), STATISTICA (версии 6,0 и 9,0 TRIAL). Для выделения этапов существенных изменений среднего и дисперсии по каждому признаку из множества разнородных был применен модуль General Classification and Regression Trees, подсистемы Data Mining (ПО STATISTICA). Стохастический анализ включал описательный анализ данных, корреляционный и регрессионный. Блок описательной статистики выполнялся для оценки однородности и симметричности выборки, корреляционный и регрессионный анализ – для оценки связей между показателями свойств, оценки характера переменных как индикаторов пространственно-временной изменчивости состояния геологической среды. При выполнении стохастического анализа соблюдались методические требования, изложенные в руководстве [1].

Основные результаты

С учетом выполнения требования о равномерности шага были выделены интервалы по времени отбора образцов: 1964–1977, 1978–1991, 1992–2007 гг. (I, II, III интерва-

лы). Каждому интервалу отвечают существенные изменения средних и дисперсии плотности частиц, влажности, модуля деформации, содержаний отдельных фракций лессовидных грунтов активной зоны. По результатам анализа всей совокупности данных о свойствах отложений *ed, vd, dPIII-I* установлено, что статистическая неоднородность присутствует на всех уровнях изучения, эксцесс и асимметрия отличаются в десятки и сотни раз (рис. 1). Ураганные значения принимают статистики (эксцесс) совокупности данных о свойствах массива за весь период наблюдений (см. распределения природной влажности и нижнего предела пластичности, плотности частиц грунта на рис. 1). При статистической обработке данных о свойствах проектируемого грунтового основания объездной автомагистрали Днепропетровск – Запорожье (2009 г.) была доказана статистическая однородность массива лессовых грунтов в условиях незначительных техногенных воздействий на геологическую среду [6]. Этот факт дает основания связать высокие значения эксцесса показателей разных групп свойств (физических, физико-химических, физико-механических) с не стационарностью состояния геологической среды в объеме зоны влияния локальной природно-техногенной системы во времени, так как территории относятся к одной таксономической единице по схеме инженерно-геологического районирования.

По результатам анализа значений коэффициента ранговой корреляции Спирмена признаки инженерно-геологических свойств, в целом, характеризуются высокой коррелируемостью. Так, коэффициент ранговой корреляции *r* принимает значения больше 0,5 в тривиальных сочетаниях: плотность грунта и природная влажность; плотность и просадочность; влажность и прочность; верхний предел пластичности – плотность частиц. В настоя-

щей работе при анализе гранулометрического состава использована классификация дисперсных грунтов [10, с. 79].

Анализ изменений грунтов зоны аэрации во времени показал, что гранулометрический состав лессовидных грунтов в зоне влияния природно-техногенной системы изменяется (табл. 1). Корреляция содержаний отдельных фракций с годом их определения присутствует, различается по характеру и тесноте. Содержание редких гравелистых микроагрегатов *R2* (размером более 2 мм) и мелкопесчаной фракции *RO, 1* (размером от 0,25 до 0,1 мм) имеет положительную корреляционную связь на протяжении всего интервала с годом определения, содержание глинистой фракции (менее 0,005 мм), действующий диаметр *D60* – отрицательную. Ранговый коэффициент корреляции положителен и равен 0,874 в первом случае и 0,172 и -0,189 – во втором. Изменения гранулометрического состава можно объяснить пептизацией, распадом микроагрегатов размером от 0,05 до 5 мм [4, с. 146], физико-химической суффозией [Там же, с. 265]. Уменьшение содержания глинистой фракции в лессовых грунтах пер-

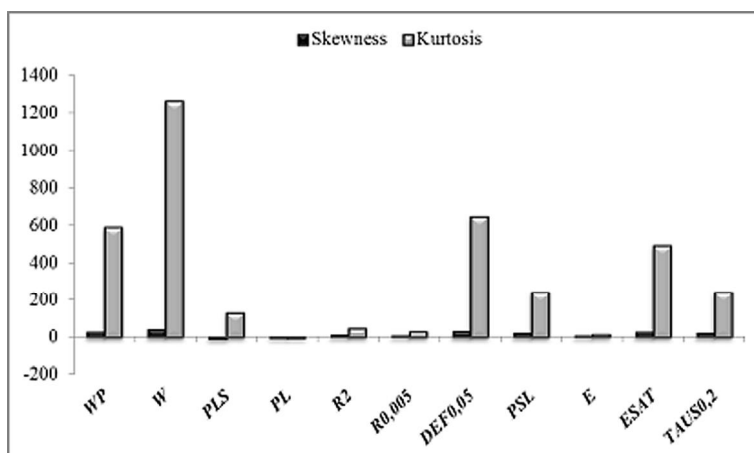


Рис. 1. Статистики совокупности "свойства лессовидных грунтов, *ed, vd, dPIII-I*", 1964–2007 гг.

Skewness – асимметрия; **Kurtosis** – эксцесс.

Показатели свойств грунта: **WP** – нижний предел пластичности (д. ед.); **W** – природная влажность (д. ед.); **PLS** – плотность частиц грунта (д. ед.); **R, RO,005** – содержание частиц по массе крупнее 2 мм и в интервале 0,01–0,005 мм, %; **DEFO,05** – абсолютная деформация при компрессии грунта естественной влажности на ступени давления 0,05 МПа; **PSL** – начальное просадочное давление (МПа); **E, ESAT** – модуль деформации (МПа) грунта естественной влажности и полного водонасыщения; **TAUS0,2** – касательное напряжение грунта полного водонасыщения на ступени нормального давления 0,2 МПа

Таблица 1. Коэффициенты ранговой корреляции показателей свойств и года определения (перигляциальная формация PIII-I, 1964–2007 гг.)

	Показатель											
	WP	R2	R0,1	RL0,005	D60	DEF0,05	DEF0,25	PSL	ESL0,3	E	FISAT	TAUS0,3
r	-0,193	0,874	0,172	-0,189	-0,14	0,392	0,419	-0,191	0,155	-0,386	0,41	0,325

Примечание: **-0,193** – величина коэффициента ранговой корреляции r нижнего предела пластичности **WP** (д. ед.) и времени определения показателя (с точностью до года); **R0,1** – содержание фракции размером 0,1–0,25 мм; **D60** – действующий диаметр частиц (мм), содержание которых меньше 60%; **ESL0,3** – относительная просадочность (д. ед.) при давлении 0,3 МПа; **FISAT** – угол внутреннего трения грунта в заданном состоянии (град.); **TAUS0,3** – касательное напряжение при сдвиге 0,3 МПа.

вого класса может быть связано с расклинивающим действием инфильтрационной влаги по мере продвижения фронта свободной жидкости, сопровождающимся выносом тонких фракций. Так как содержание крупнодисперсных частиц и дисперсность среды увеличиваются, степень неоднородности становится выше, возникают дополнительные условия для суффозии, повышается пластичность, деградирует просадочность. Изменение соотношений песчаных и глинистых фракций в результате изменения физического состояния грунтов влияет на деформируемость и прочность.

В реальных условиях изменение массива просадочных грунтов как открытой динамической системы является результатом механических, тепловых и других видов воздействий, оказываемых комплексно. Коррелируемость со временем отбора показателей гранулометрического состава сильнее, чем у показателей физических и механических свойств. В результате деградации просадочных свойств зоны аэрации при техногенезе гранулометрический состав изменяется. Направленность изменений, закономерное развитие при техногенных воздействиях в различных ландшафтно-климатических условиях, в зонах присутствия перигляциальных отложений указывают на возможность и необходимость изучения деградации просадочных свойств массива как инженерно-геологического процесса.

Особенности изменений свойств должны определяться, в числе других факторов, таксономическим уровнем объекта. Действительно, изменчивый режим влажности (верхнеплейстоценовые отложения, зона аэрации) приводит к изменению дисперсности и пределов пластичности с сохранением тенденций, общих для массива:

деформируемость увеличивается, тенденции изменения прочности неоднозначны (табл. 2).

Однозначного соответствия между колебаниями влажности, деградацией просадочности, изменением пластичности, показателями деформационных и прочностных свойств нет. Максимальны изменения относительных деформаций в интервале давлений, близких к природным нагрузкам. Приращение показателей за I-II, II-III, I-III интервалы (рис. 2) указывают на тесную связь между колебаниями влажности, содержанием мелко- и крупнопылевой, тонкопесчаной фракций, механическими свойствами. Так, повышение влажности грунтов зоны аэрации (1964–1991 гг.) сопровождалось резким снижением содержания тонкопесчаной и увеличением пылевой фракций, что существенно отразилось на деформируемости и прочности грунтов, слагающих грунтовое основание зданий и сооружений исторической части города.

Изучение процессов деградации свойств просадочных грунтов на уровне стратиграфо-генетических разностей позволяет оценить влияние палеогеоморфологических сингенетических условий на развитие инженерно-геологических процессов. Так, причерноморско-дофиновский горизонт **ed, vdlIpc+df** охарактеризовался максимальной, относительно других возрастных генераций, величиной эксцесса модуля деформации. Это указывает на формирование резкой неоднородности в распределении прежде всего механических свойств из-за изменений агрегатного состава. Переход на более низкий таксономический уровень изучения (данные о свойствах горизонта, полученные на протяжении заданного интервала времени – причерноморско-дофиновский горизонт, 1964–1977 гг.) показал, что нап-

Таблица 2. Средние показатели свойств верхнеплейстоценовых отложений PIII в границах зоны влияния природно-техногенной системы (I, II, III расчетные периоды, выборочные данные)

Показатель	Расчетный период		
	I	II	III
<i>WL</i>	0,25	0,2744	0,275
<i>WP</i>	0,189	0,201	0,196
<i>W</i>	0,118	0,222	0,214
<i>DEF0,05</i>	0,081	0,175	0,279
<i>PSL</i>	0,154	0,182	0,091
<i>CSAT</i>	0,057	0,011	0,023

Примечание: *WL* – верхний предел пластичности (д. е.); *DEF0,05* – относительная деформация грунта на ступени давления 0,05 МПа; *CSAT* – удельное сцепление (МПа), состояние полного водонасыщения.

равненное изменение состояния грунта происходило при сохранении общих тенденций. Уменьшение модуля деформации, повышение параметров прочности, уменьшение действующего диаметра частиц грунта было следствием аккумуляции мелкопесчаной фракции после распада крупных агрегатов при повышении влажности. Дальнейшие изменения свойств горизонта во времени типичны: после резких изменений физического состояния (1978–1991 гг.) и стабилизации влажности (1992–2007 гг.) продолжается, но не так интенсивно, деградация просадочных и механических свойств (табл. 3). В результате анализа особенностей изменений свойств однотипных по условиям формирования климатолитов установлены следующие особенности.

В лессовидных суглинках бугского *vdlllbg* и днепровского *vdllldn* горизонтов

повышение пластичности и плотности, уменьшение модуля деформации, увеличение прочности вызваны ростом влажности и перераспределением фракций. Зафиксировано уменьшение плотности частиц и увеличение плотности грунта бугского горизонта. Увеличение во времени угла внутреннего трения, падение сцепления лучше выражено в бугском горизонте. Общность в изменении физико-механических свойств субаэральных горизонтов очевидна, так как значения коэффициентов корреляции переменных "удельное сцепление", "содержание частиц размером 0,1–0,01 мм" с годом их определения совпадают, а переменных "влажность", "модуль деформации" – близки. Величина коэффициента ранговой корреляции *r* содержаний отдельных фракций с годом их определения выше в 3–7 раз, чем корреляция со временем природной влаж-

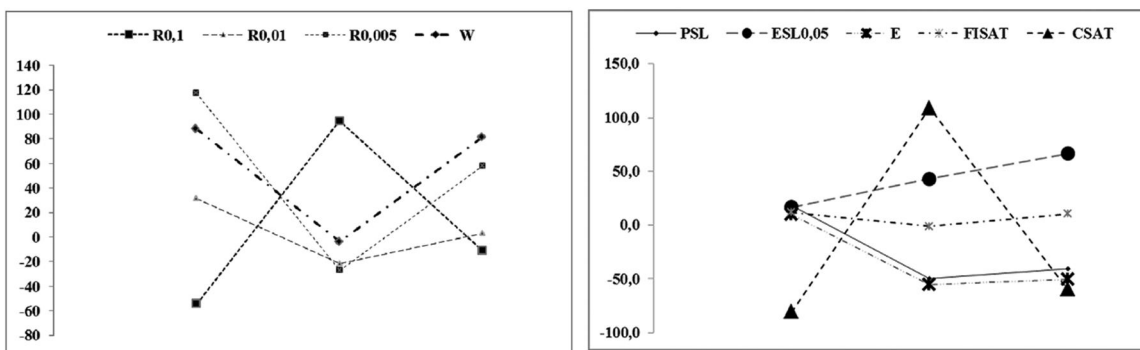


Рис. 2. Приращения показателей свойств перигляциальных грунтов PIII на протяжении I-II, II-III, I-III интервалов (1964–1991; 1978–2007; 1964–2007 гг.), в % от начальных значений

RO,005; RO,01; RO,1 – содержание фракций, размер частиц 0,005–0,01 мм; 0,01–0,1 мм; 0,1–0,25 мм; *W* – природная влажность (д. е.); *PSL* – начальное просадочное давление (МПа); *ESL0,05* – коэффициент относительной просадочности на ступени давления 0,05 МПа (д. е.); показатели прочности (состояние полного водонасыщения): угол внутреннего трения *FISA* (град.) и удельное сцепление *CSAT* (МПа)

Таблица 3. Приращения показателей свойств причерноморско-дофиновского горизонта I-II, II-III, I-III интервалов (1964–1991, 1978–2007, 1964–2007 гг.), в % от начальных значений

Показатель	Расчетный период		
	I-II	II-III	I-III
<i>WL</i>	11	-1	9
<i>WP</i>	7	-1	6
<i>W</i>	90	-1	89
<i>DEF0,05</i>	34	11	48
<i>ESL0,05</i>	-31	27	-13
<i>ESL0,3</i>	-28	-14	-38
<i>CSAT</i>	-69	0	-69

Примечание см. на рис. 1, 2 и табл. 1, 2.

ности. Можно предположить, что изменения агрегатного состава во времени являются не менее важным фактором механического поведения, чем изменения влажности. Увеличение действующего диаметра частиц, независимость содержания мелкопылеватой фракций от времени отбора указывают на искусственный характер уменьшения дисперсности. Изменение содержания тонких фракций в зоне неполного водонасыщения может происходить в результате деградации просадочных свойств за счет расклинивающего эффекта связной и капиллярной влаги (А. А. Мустафаев, 1978).

Ранговая корреляция свойств неоднородного палеопочвенного горизонта

Таблица 4. Приращения средних показателей свойств палеопочвенных отложений *edllvt*, *edllpl*, *edllkd* на протяжении I-II, II-III, I-III интервалов (1964–1991; 1978–2007; 1964–2007 гг.)

Показатель	Расчетный период		
	I-II	II-III	I-III
<i>W</i>	45	1	47
<i>R0,1</i>	77	80	219
<i>R0,01</i>	-20	45	16
<i>R0,005</i>	269	-72	3
<i>DEF0,05</i>	115	164	468
<i>E</i>	-20	-54	-63
<i>FISAT</i>	11	6	18
<i>CSAT</i>	-65	-31	-76

Примечание см. на рис. 1, 2 и табл. 1, 2. Приращения рассчитаны в % от начальных значений.

(*edllvt*, *edllpl*, *edllkd*) показывает, что поведение горизонта частично соответствует поведению лессовидных суглинков: рост влажности и плотности приводит к распаду мелкопесчаных агрегатов, увеличиваются деформируемость и трение (табл. 4). Резкие изменения содержания фракций, деформируемости и прочности происходили на протяжении 1978–1991 гг. Изменения удельного сцепления были выражены сильнее, чем угла внутреннего трения, несмотря на преобладание аккумуляции мелкопесчаных фракций над выносом пылеватых и глинистых частиц.

Интенсивный распад пылеватых агрегатов и вынос глинистых продуктов разрушения нижележащего палеопочвенного горизонта (завадовский *edllzv*) происходят на фоне слабо изменяющихся во времени показателей физического состояния грунта (плотности *PL*, влажности *W*). Аккумуляция мелкопесчаной и вынос пылеватой фракций приводят к снижению плотности частиц, росту удельного сцепления из-за независимого от времени содержания глинистых фракций. В результате деформационные свойства ухудшаются, а прочность – увеличивается. Анализ изменений свойств нерасчлененных нижнеплейстоценовых отложений *edlmr*, *edllb*, *edl* показал, что содержание крупнопылеватой фракции уменьшается ($r = -0,58$), а мелкопылеватой – увеличивается ($r = 0,76$), что приводит к снижению значений модуля деформации и удельного сцепления грунтов.

Закономерности изменчивости во времени свойств причерноморско-дофиновского горизонта и нижнеплейстоценовых нерасчлененных отложений сложного генезиса не соответствуют особенностям деградации перигляциальных субаэральных лессовидных суглинков и супесей, являющихся средой мигрирующих при подтоплении капиллярных и связных вод. Так, однотипная тенденция на изменение состояния (увеличение деформируемости и снижение

прочности) выражена у **причерноморско-дофиновского** и нижнеплейстоценовых палеопочвенных горизонтов. У лессовидных и палеопочвенных горизонтов (за исключением завадовского горизонта) увеличение деформируемости в различной степени компенсируется увеличением угла внутреннего трения; тенденции изменений механических свойств бугско-завадовских отложений неоднозначны.

Выводы

В результате стохастического анализа массива данных о свойствах грунтов перигляциальной формации на территории г. Днепропетровск (1964–2007 гг.) можно утверждать следующее:

– Рост дисперсности грунтов перигляциальной формации в процессе техногенеза на фоне увеличения неоднородности фракционного состава сопутствует деградации просадочности, подвижности связей между показателями свойств во времени.

– Повышение влажности грунтов зоны аэрации (1978–1991 гг.) сопровождалось снижением содержания тонкопесчаной и увеличением пылеватой фракций.

– В лессовидных субаэральных суглинках бугского **vdlllbg** и днепровского **vdlldn** горизонтов повышение пластичности и плотности привело к уменьшению значений модуля деформации и удельного сцепления.

– Механизм изменения прочности лессовидных и палеопочвенных горизонтов в зоне влияния определяется их генетическими особенностями, в первом случае прочность увеличивается, во втором – уменьшается.

– Закономерности изменчивости во времени свойств причерноморско-дофиновского горизонта и нижнеплейстоценовых нерасчлененных отложений сложного генезиса не соответствуют особенностям деградации субаэральных лессовидных суглинков и супесей.

Список литературы

1. *Бородич С. А.* Вводный курс эконометрики: Учебное пособие. – Минск: Изд-во БГУ, 2000. – 354 с.

2. *Инженерно-геологическое* районирование территории г. Днепропетровска / Скабалланович И. А., Сафронов Л. И., Колдунов В. Г. и др. – Днепропетровск, 1948. – 321 с.
3. *Кравченко А. И.* Инженерно-геологическая карта просадочных свойств грунтов г. Днепропетровска. – Днепропетровск, 1978. – 106 с.
4. *Ларионов А. К., Приклонский В. А., Ананьев В. П.* Лессовые породы и их строительные свойства. – М.: Госгеолтехиздат, 1959. – 367 с.
5. *Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород:* В 2 т. / Под ред. Е. М. Сергеева. – М.: Недра, 1984. – Т. 2. – 438 с.
6. *Орач В. С.* Південний обхід м. Дніпропетровська: Звіт про інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови: В 3 т. – Дніпропетровськ: ДніпроДІПроДор, 2009.
7. *Отчет об инженерно-геологической съемке:* В 5 т. / Подгорнова Н. Ф., Пустовой В. У., Чугуй В. А., Яковлев Е. А. – Днепропетровск, 1964. – Т. 2.
8. *Рященко Т. Г., Ухова Н. Н., Штельмах С. И.* Применение ГИС-технологий при изучении дисперсных грунтов юга Восточной Сибири // Сергеевские чтения: Моделирование при решении геоэкологических задач. Вып. 11. Материалы годич. сес. РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23–24 марта 2009). – М.: ГЕОС, 2009. – С. 222–227.
9. *Сучасні інженерно-геологічні умови України як складова безпеки життєдіяльності / Климух Л. М., Блинов П. В., Величко В. Ф. та ін.* – К.: Експрес, 2008. – 224 с.
10. *Jiangfeng Wang, Qihai Guo, Zhiquan Huang, Yanbin Gao.* Experimental study on structural properties influencing on compressibility and shear strength of soft clay/Engeopro-2011 // International Conference under the aegis of IAEG, Moscow, Russia, September 6–8 2011: Abstract to Proceedings. – Moscow, 2011. – P. 185–268.

Днепропетр. нац. ун-т
им. Олеса Гончара,
Днепропетровск

Статья поступила
16.11.12