



УДК 624.131 (477)

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ СРЕДНЕГО ПРИДНЕПРОВЬЯ МЕТОДОМ ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ

**Т.П. Мокрицкая**

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, просп. Гагарина, 72, г. Днепр, 49010, Украина,  
*mokritska@i.ua*

Доказана применимость метода группового учета аргументов к решению задач классификации просадочных грунтов, подвергающихся техногенному воздействию. Математическое моделирование методом группового учета аргументов позволило создать модели изменчивости прогнозных свойств просадочных грунтов, как результат изменения их физического состояния, пластичности в пространственно-временных координатах. Анализ связей между группами свойств лессовых грунтов в природных и техногенных условиях (1951-2008 гг.), позволил установить как факторы деградации просадочности, так и особенности изменения факторов. В предшествующих работах (Mokritskaya, 2013) доказано, что изменение свойств лессовых грунтов в процессе техногенеза является деградацией, так как сопровождается разрушением структуры грунта и статистической структуры связей между свойствами и координатами.

*Ключевые слова:* деградация, просадочность, метод группового учета аргументов.

## АНАЛІЗ МІНЛИВІСТІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДИСПЕРСНИХ ГРУНТІВ СЕРЕДНЬОГО ПРИДНІПРОВ'Я МЕТОДОМ ГРУПОВОГО ОБЛІКУ АРГУМЕНТІВ

**Т.П. Мокрицька**

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, просп. Гагаріна, 72, м. Дніпро, 49010, Україна,  
*mokritska@i.ua*

Доведено можливість застосування методу групового обліку аргументів до вирішення завдань класифікації просідаючих ґрунтів, що піддаються техногенному впливу. Математичне моделювання методом групового обліку аргументів дозволило створити моделі мінливості прогнозних властивостей просідання ґрунтів, як результат зміни їх фізичного стану, пластичності в просторово-часових координатах. Аналіз зв'язків між групами властивостей лесових ґрунтів у природних і техногенних умовах (1951-2008 рр.), дозволив встановити як фактори деградації просідання, так і особливості зміни факторів. У попередніх роботах (Mokritskaya, 2013) доведено, що зміна властивостей лесових ґрунтів в процесі техногенезу є деградацією, так як супроводжується руйнуванням структури ґрунту і статистичної структури зв'язків між властивостями і координатами.

*Ключові слова:* деградація, просідання, метод групового обліку аргументів.

## ANALYSIS OF PROPERTIES VARIATION OF DISPERSED SOILS OF MIDDLE DNIPRO RIVER BY GMDH GROUP METHOD

**T.P. Mokritskaya**

Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarin Ave., 72, Dnipro, 49044, Ukraine, *mokritska@i.ua*

We prove that the group method of data can be used to solve problems of classification subsiding soils exposed to human impact. Mathematical modeling has allowed to create predictive models of variability of properties of soil subsidence as a result of changes in their physical condition, plasticity in the space-time coordinates. The analysis of relationships between groups of properties of loess soils in natural and man-made environment (1951-2008 years) has allowed to define both degradation factors subsidence and features of their changes. In (Mokritskaya, 2013) it was proved that the change in the properties of loess soils in the process of a technogenic degradation, as accompanied by the destruction of soil structure and the structure of the statistical links between the properties and coordinates.

*Keywords:* degradation, prosadochnost, Multi-method accounting arguments.

### Постановка проблеми

Деградацией назовем процесс изменения свойств и структуры лессовых грунтов, под действием внешних (техногенных) факторов, приводящий к необратимому изменению состава и состояния просадочных грунтов. Изучение связей между признаками и особенностями поведения лессовых пород позволило сформулировать представление о просадочности как о специфическом свойстве, характерном для отложений внеледниковой формации. В процессе техногенеза просадочность необратимо уменьшается, изменяется структура

грунта и его состояние. Существующие методы количественной оценки и прогноза построены на упрощенной модели зависимости деформаций грунта от давления в разном физическом состоянии. Для моделирования поведения сложных систем успешно применяется в различных областях знаний метод группового учета аргументов (<http://www.gmdh.net>). Оптимальная модель связи между множеством факторов и величиной относительной просадочности, описывающая деградацию в условиях техногенеза, в конкретных инженерно-геологических условиях, может быть получена по итогам индуктивного моделирования. Интерпретация

результатов моделирования позволила на основании анализа состава и важности факторных переменных установить важные закономерности изменений лессовидных грунтов при техногенезе.

### Фактический материал

При выполнении работы использованы материалы производственных исследований, выполненных на территории городов Запорожье и Днепродзержинск, а также их окрестностях в 1951-2008 гг. Составлена единая база данных, общее количество строк – 459, общее количество полей – 72. Поля включают данные о годе и месте определения свойств, наименовании, генезисе горизонта, составе и свойствах.

### Изложение результатов и их обсуждение

Целью исследования явилась дальнейшая апробация методики решения классификационных и прогнозных задач методами индуктивного моделирования (метод группового учета аргументов). Задачи исследования включили следующие: поиск оптимальных моделей зависимости относительной просадочности горизонтов от факторов (гранулометрического состава, физического состояния, координат), анализ построенных моделей и связей между факторами просадочности.

Несмотря на то, что все материалы исследований выполнены в соответствии с методическими требованиями, они нерегулярны. Анализ изменений свойств грунтов может быть выполнен с позиций классической теории случайных процессов, после существенного преобразования данных (Ивахненко, Юрачковский, 1987). Метод группового учета аргументов позволяет получить оптимальные по сложности модели на основании индуктивного подхода. Изучение связей между показателями состава (дисперсности) и свойств (физических и механических), характеризующих состояние объектов, находящихся в сходных региональных условиях, но отличающихся по интенсивности и особенностям техногенных воздействий, что необходимо для оценки степени деградации связей.

В ненарушенных условиях модели связи содержания отдельных фракций, глубины отбора и физических свойств (плотность грунта и частиц грунта), определяющие значения природной влажности изучены по результатам обработки материалов инженерно-геологических исследований, выполненных на территории Запорожской области (по данным П.А. Мироненко, 1951). Выбраны данные определений свойств по 40 монолитам, описанным как суглинки лессовидные, средние, отобранным с глубин 1,0-2,8 м на территории, входящей в зону влияния источников механических

воздействий. Изучена изменчивость свойств причерноморско-дофиновских нерасчлененных отложений (залегающих под современным почвенным покровом) на территории соседних объектов г. Запорожье: селитебной зоны левобережья (данные 1951-1956), на территории металлургического завода (данные 1973-2008).

По данным 1951-1956 гг. уровень грунтовых вод в эпицентрах разрозненных куполов, в толще лессовидных суглинков, находился на глубинах 4,0-6,0 м, вне куполов залегал на глубинах от 19,0 до 40,0 м, подчиняясь геоморфологической зональности. Общее количество монолитов из лессовидных суглинков составило 120, определены физические и механические показатели свойств, просадочность, прочность, максимальная молекулярная влагоемкость (табл. 1).

Построены индуктивные модели зависимости природной влажности от гранулометрического состава, глубины отбора, плотности грунта и частиц, а также верхнего предела пластичности (табл. 1). Все модели связи различных групп свойств по наличию или отсутствию временной координаты  $t$ , год, разделены на статические и динамические. Анализ знаков при коэффициентах (детерминированная компонента) позволяет сделать важные выводы о закономерностях изменения связей между показателями. Выполнен анализ детерминированной компоненты нелинейных моделей, проанализированы величины и знаки при линейных членах. Так, в естественных условиях величина природной влажности  $W$ , д. ед., определялась в наибольшей степени содержанием тонкодисперсных (глинистых) частиц на разных глубинах. На это указывают уменьшающиеся значения коэффициентов при переменных «влажность на границе текучести, глубина отбора, плотность частиц грунта». В условиях городской малоэтажной застройки фактором детерминизма модели влажности было содержание пылеватых частиц. Роль содержания пылеватых и крупноглинистых фракций, как детерминированных факторов влажности грунта, в зоне промышленного предприятия, полностью нивелирована.

Динамические модели зависимости относительной просадочности от физического состояния получены избирательно, на ступенях давления 0,1 и 0,3 мПа и только при условии, когда в состав анализируемых переменных было включено содержание фракции 0,5-0,25 мм (табл. 2). Выражена тенденция к слабому уменьшению просадочности в интервале природных давлений, и увеличение просадочности в зоне влияния сооружений (давление 0,3 мПа). Динамические модели связи модуля деформации  $E$ , МПа и показателей физических свойств показывают, что уменьшение содержания тонкодисперсных фракций (размером менее 0,005 мм) является фактором увеличения влажности и модуля деформации. Уменьшение модуля

Результаты индуктивного моделирования зависимости природной влажности от физических свойств и гранулометрического состава

Таблица 1.

| № | n  | Года    | Коэффициенты при линейных членах полинома |             |           |            |       |        |        |
|---|----|---------|---|-------------|-----------|------------|-------|--------|--------|
|   |    |         | Факторные переменные                      |             |           |            |       |        |        |
|   |    |         | Z   | Фракции, мм |           |            | WL    | PL     | PLS    |
|   |    |         |   | 0,1-0,05    | 0,05-0,01 | 0,01-0,005 |       |        |        |
| 1 | 17 | 1950    | 0,375                                     |             | 0,003     | 0,293      | 1,34  | 0,038  | -0,065 |
| 2 | 13 | 1973-84 | 0,395                                     |             |           |            | 0,127 | -0,119 | 0,072  |
| 3 | 68 | 1951-56 |   | -0,004      |           |            | 1,191 | -0,455 | -0,015 |

Примечание к табл. 1: №1 – материалы геологической съемки, окрестности г. Запорожье, 1950 г.; №2 – материалы инженерно-геологических исследований на площадке металлургического предприятия, 1973 - 1984 гг.; №3 – материалы инженерно-геологических исследований, 1951 – 1956 гг., селитебная зона, г. Запорожье; n – количество определений

деформации и природной влажности сопровождается увеличением содержания частиц размером 0,05-0,01 мм. Время является фактором в модели, связывающей содержание тонкопесчаной фракции и значений угла внутреннего трения или максимальной молекулярной влагоемкости.

Содержание фракции 0,5-0,25 мм – факторная переменная в модели прочности, тонкопесчаная фракция (0,25-0,1 мм) является фактором в моделях механических свойств, кроме просадочности. Содержание крупнопылеватой фракции, 0,1-0,05 мм, является фактором во всех моделях, за исключением относительной просадочности на ступени давления 0,05 мПа. В наибольшей степени содержание этой фракции влияет на значения удельного сцепления, в меньшей степени – на значения модуля деформации. Повышение содержания крупнопылеватой фракции увеличивает величину относительной просадочности в интервале давлений, больших структурной прочности. На ступени 0,15 мПа, связь между количеством крупнопылеватых частиц и величиной относительной просадочности обратная.

Природная влажность – главный фактор детерминированной компоненты зависимостей механических свойств от физических. Исключением является относительная просадочность, на ступенях 0,1-0,15 мПа. Наибольшие значения приобретают коэффициенты в моделях, связи механических свойств и содержание фракции размером частиц 0,05-0,01 мм. Наибольшее значение коэффициента при линейном члене полинома достигается в модели зависимости относительной просадочности на ступени 0,2 мПа. Эффект усиления «детерминизма» после преодоления структурной прочности, был ранее установлен по итогам стохастического ана-

лиза результатов лабораторных испытаний на просадочность (New roads Russia..., 2011). Увеличение содержания во времени фракции сопровождается уменьшением модуля деформации и увеличением угла внутреннего трения. Вклад глинистой фракции 0,01-0,005 мм приводит к уменьшению значений коэффициентов и сокращению количества линейных членов индуктивных моделей связи механических и физических свойств, за исключением модели относительной просадочности на ступени 0,3 мПа. Плотность грунта чаще выбирается в качестве факторной переменной, чем природная влажность. Содержание тонкоглинистой фракции является фактором линейных компонентов моделей связи только в моделях зависимости модуля деформации и угла внутреннего трения от физических свойств, связь обратная. От песчаной (0,25-0,1 мм) к тонким фракциям (размер частиц менее 0,005 мм), уменьшаются значения коэффициентов при линейных членах полинома, их количество. Линейный характер связей между содержанием отдельных фракций и механическими свойствами лучше выражен, если в факторы включено содержание частиц размером 0,1-0,05 мм.

Анализ результатов индуктивного моделирования связей между просадочностью и физическими свойствами пород зоны аэрации на площадке с интенсивным техногенным воздействием (металлургический комбинат, табл. 3) показал, что закономерности деградации в разных региональных условиях одинаковы. Время является факторной переменной в моделях, связывающих параметры прочности и физические свойства грунта. Значения угла внутреннего трения причерноморско-дофиновского горизонта падают, а заваловского увеличиваются, что ранее было установлено на примере г. Днепропетровска (Мокрицкая, 2013).

Таблица 2.

Выборочные коэффициенты при линейных членах индуктивных моделей связи показателей механических и физических свойств лессовой формации (г. Запорожье, 1951г.)

| Фракция,<br>мм | Функция | Коэффициенты при линейных членах полинома |         |          |          |        |         |        |
|----------------|---------|---|---------|----------|----------|--------|---------|--------|
|                |         | t   | z       | WL       | W        | PLS    | PL      | R      |
| 0.5-0,25       | ESL0,05 |   | -0,047  |          | -0,5     | -0,005 | 0,004   |        |
|                | ESL0,3  | 0,014                                     | 0,009   |          |          | 0,051  | -0,224  |        |
|                | E       | 1,431                                     |         | +        | -23,62   | -1,422 | 3,426   |        |
|                | FI      |   |         |          | 29,011   | 0,811  | 2,302   | -0,926 |
|                | C       |   |         | 0,006    |          | 0,002  |         | -0,069 |
| 0.25-0,1       | ESL0,05 |   |         | 0,019    | -0,001   | 0,001  | -0,003  |        |
|                | ESL0,25 |   | 0,005   | 0,098    |          | 0,005  | -0,001  |        |
|                | E       |   |         | -6,723   | -242,193 | -2,368 | 0,981   | 1,658  |
|                | FI      | 1,024                                     |         | 7,853    |          | 1,930  | 0,690   | 0,388  |
|                | C       |   |         | 0,003    | +        | 0,001  | -0,003  | -0,014 |
| 0.1-0,05       | ESL0,05 |   | +       | +        | -0,001   | 0,005  | -0,012  |        |
|                | ESL0,3  |   | 8,517   | -4,984   | 90,224   |        | 0,999   | 2,856  |
|                | E       |   | 11,519  | -42,963  | 109,058  |        | 0,258   | 1,883  |
|                | FI      |   | 7,227   | -13,392  | 104,828  |        | 0,739   | 3,068  |
|                | C       |   | 8,570   | -41,054  | 83,999   |        | -0,166  | 6,166  |
| 0.05-0,01      | ESL0,05 |   |         | +        |          |        | 0,0011  | +      |
|                | ESL0,3  |   | 0,0013  |          |          | 0,001  | 0,0033  | 0,001  |
|                | E       | -8,942                                    |         | -114,94  | -0,125   | -0,877 | 0,149   | 0,01   |
|                | FI      | 3,415                                     | 0,475   | 9,334    |          | 2,057  | 1,163   | 0,007  |
|                | C       |   |         | 0,007    |          | 0,001  | -0,029  |        |
| 0.01-0,005     | ESL0,05 |   |         |          |          | 0,002  | -0,003  | +      |
|                | ESL0,3  |   | -109,99 | +        |          | 3126   | -3400,4 | 0,005  |
|                | E       | -0,538                                    |         | -1,161   | 0,485    | -0,149 | -1,182  |        |
|                | FI      | 1,852                                     | +       | 3,301    |          | 2,484  | +       | 0,019  |
|                | C       |   | +       | -0,014   |          | +      | -0,017  |        |
| Менее 0,005    | ESL0,05 |   | +       | +        | -0,001   | 0,005  | -0,012  |        |
|                | E       | 3,261                                     | -0,089  | -872,641 | 58,091   | 1,233  | -0,080  | -0,590 |
|                | FI      | 1,761                                     | 0,500   | 2,775    |          | 1,948  | 0,360   | -0,080 |
| -              | ESL0,05 |   | +       |          | 0,166    |        |         | -0,001 |
|                | ESL0,3  |   | 0,001   |          |          |        | 0,003   | -0,002 |
|                | E       | -0,906                                    |         | +        | 6,691    | 1,329  | 0,338   | 1,367  |
|                | FI      | 3,812                                     | 0,660   | 12,032   | 20,410   |        | 1,661   | 1,061  |
|                | C       |   | +       | 0,120    | -0,073   | 0,001  | 0,001   |        |

Примечания: 1. *t*, год – условный год от начала ряда; *z*, м; – глубина отбора; *WL*, д.ед. – влажность на границе текучести; *W*, д.ед. – природная влажность; *PLS*, г/см<sup>3</sup>, плотность частиц грунта; *PL*, г/см<sup>3</sup> – плотность грунта – факторные переменные. 2. Функция: относительная просадочность на ступенях давления 0,05-0,3 мПа – *ESL0,05* - 0,3, д.ед.; *E*, мПа, - модуль деформации; *FI* – угол внутреннего трения, град.; *C* – удельное сцепление, мПа.

Связь относительной просадочности причерноморско-дофиновских отложений, содержания фракций и физического состояния выражена слабо (табл. 4). В наибольшей степени линейный харак-

тер выражен в модели, связывающей значения угла внутреннего трения, содержание фракции 0,5-0,25 мм и другие показатели. В меньшей степени детерминизм определяется содержанием тонкодисперс-

Таблица 3.

Выборочные результаты индуктивного моделирования деградации просадочных свойств просадочных грунтов на примере ЗАО «Запорожский металлургический завод»

| Индекс        | Функция | Факторные переменные |        |         |       |        |        |        |
|---------------|---------|----------------------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|
|               |         | t                    | Z      | W       | PL    | PLS    | WL     | WP     |
| ed,vPIIрch,df | C       | +                    |        | 0,003   | +     |        | 0,002  | 0,002  |
|               | FI      | -0,531               |        | -17,015 | 0,101 | 0,587  | 3,393  | 2,412  |
|               | E       |                      | -1,094 | 8,323   | 7,861 | -0,690 |        | 47,985 |
|               | ESL0,3  |                      |        |         | 0,002 |        | -0,004 | 0,012  |
| ePIIzv        | C       | +                    |        | -0,239  | 0,004 | -0,006 | -0,009 | 0,338  |
|               | FI      | 0,051                | -0,370 | -14,700 | 1,435 | -0,041 |        | 64,772 |

Примечания: 1. *t*, год – условный год от начала ряда; *z*, м; – глубина отбора; *WL*, д.ед. – влажность на границе текучести; *W*, д.ед. – природная влажность; *PLS*, г/см<sup>3</sup>, плотность частиц грунта; *PL*, г/см<sup>3</sup> – плотность грунта - факторные переменные. 2. Функция: относительная просадочность на ступенях давления 0,05-0,3 мПа – *ESL0,05 - 0,3*, д.ед.; *E*, мПа, - модуль деформации; *FI* – угол внутреннего трения, град.; *C* – удельное сцепление, мПа

Таблица 4.

Выборочные результаты индуктивного моделирования зависимости относительной просадочности от координат, показателей физических свойств и гранулометрического состава (ОАО «Запорожсталь»).

| Индекс        | Функция | Факторные переменные |        |         |       |        |        |        |
|---------------|---------|----------------------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|
|               |         | t                    | Z      | W       | PL    | PLS    | WL     | WP     |
| ed,vPIIрch,df | C       | +                    |        | 0,003   | +     |        | 0,002  | 0,002  |
|               | FI      | -0,531               |        | -17,015 | 0,101 | 0,587  | 3,393  | 2,412  |
|               | E       |                      | -1,094 | 8,323   | 7,861 | -0,690 |        | 47,985 |
|               | ESL0,3  |                      |        |         | 0,002 |        | -0,004 | 0,012  |
| ePIIzv        | C       | +                    |        | -0,239  | 0,004 | -0,006 | -0,009 | 0,338  |
|               | FI      | 0,051                | -0,370 | -14,700 | 1,435 | -0,041 |        | 64,772 |

Примечания: 1. *t*, год – условный год от начала ряда; *z*, м; – глубина отбора; *WL*, д.ед. – влажность на границе текучести; *W*, д.ед. – природная влажность; *PLS*, г/см<sup>3</sup>, плотность частиц грунта; *PL*, г/см<sup>3</sup> – плотность грунта - факторные переменные. 2. Функция: относительная просадочность на ступенях давления 0,05-0,3 мПа – *ESL0,05 - 0,3*, д.ед.; *E*, мПа, - модуль деформации; *FI* – угол внутреннего трения, град.; *C* – удельное сцепление, мПа

ных частиц (размером менее 0,005 мм, 0,01-0,005 мм), увеличение содержания которых является результатом распада микроагрегатов, в том числе, имеющих размеры 0,5-0,25 мм. Подтверждена тенденция к увеличению значений угла внутреннего трения, как результат увеличения содержаний тонких фракций, в основном размером 0,01-0,005 мм и менее 0,005 мм, на что указывает положительное значение коэффициента при переменной «содержание фракции». В этих моделях также высоки и положительны значения коэффициентов при переменной «естественная влажность», что указывает на происходящие резкие процессы повышения влажности и разуплотнения, связанные с изменением микроагрегатного состава грунта.

Сравнение результатов моделирования связей между переменными, характеризующих сильно (табл. 4) и слабонарушенные условия (табл. 1), показывает, что в условиях интенсивных техногенных воздействий изменяется гранулометрический состав и роль отдельных фракций, как факторов детерминизма. Содержание фракции 0,1-0,05 мм

определяет детерминизм в слабонарушенных условиях. Содержание тонкодисперсных фракций, размером от 0,01-0,005 до менее 0,005 мм, является фактором детерминизма в условиях роста интенсивности техногенеза. Особенности изменчивости свойств лессовых грунтов, установленных в окрестностях и на территории г. Запорожье, не противоречат результатам моделирования состояния лессовой формации в иных региональных условиях.

## Выводы

- Детерминизм связей между механическими и физическими свойствами зависит от интенсивности внешнего фактора (давления), что установлено методами стохастического и индуктивного моделирования.
- Выраженность детерминированной компоненты модели зависит от изменений фракционного состава.
- Чем меньше размер фракции, тем меньше давление, при котором связь данной фракции с относительной просадочностью ближе к линейной.

**Список литературы**

1. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. – М.: «Радио и связь», 1987. – 120 с.
2. Новые дороги России: сборник трудов Международной конференции. Пенза, 14-17 ноября 2011 г. / Под общ. ред. Г.Г. Болдырева. – Саратов: ООО «Издательский центр «Наука», 2011. – С. 226-232.
3. Мокрицкая Т.П. Закономерности деградации свойств лессового массива в условиях техногенеза // Геологический журнал. – 2013. – № 1. – С. 72-77.
4. Mokritskaya T.P., Koryashkina L.S. Degradation in loesses factors and models // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2013. – № 4 – С. 5-12.
5. Электронный ресурс: <http://www.gmdh.net>.

**References**

1. Ivakhnenko AG, Yurachkovsky Y.P. 1987. Simulation of complex systems from experimental data. Moskow. Radio and Communication. 120 p.
2. New roads Russia: Proceedings of the International Conference. Penza, 14-17 November 2011 / Ed. GG Boldyrev. Saratov. Nauka. 2011. pp. 226-232.
3. Mokritskaya T.P. Patterns of degradation properties of loess array technogenesis / T.P. Mokritskaya. Geological Journal. 2013. no. 1. pp. 72-77.
4. Mokritskaya T.P., Koryashkina L.S. 2013. Degradation in loesses factors and models. Scientific Bulletin of National Mining University. no. 4, pp. 5-12.
5. <http://www.gmdh.net>.

Статья поступила 12.03.2016