

УДК 574+551.43

## Тенденции динамики солевого состава грунтов зоны аэрации городских природно-технических систем на примере территории г. Днепр

В. В. Фундовая, Т. П. Мокрицкая

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепр, Украина, [vfundovai@gmail.com](mailto:vfundovai@gmail.com)*

По данным геохимического мониторинга территории правого берега г. Днепр за период 1982 – 1990 гг. выполнен химический анализ водно-солевых вытяжек пород зоны аэрации. В результате обработки рассчитано процентное содержание солей, определен их тип и степень засоления. Изучены закономерности распределения солей в зоне аэрации на изучаемой территории. На территории правого берега р. Днепр были выделены ключевые участки по трем факторам: геологическое строение, геоморфологические условия, тип техногенного воздействия. На участках проанализированы изменения солевого состава грунтов зоны аэрации за восемь лет методами статистического анализа. Выполнен анализ изменения содержания и степени засоления токсичными солями пород зоны аэрации районов жилой застройки и районов размещения промышленных сооружений за такой же период. Так, из-за широкой распространенности лессовидных и лессовых грунтов в зоне влияния различных природно-техногенных систем Украины изучение динамики их свойств как результата изменений солевого состава является актуальным.

*Ключевые слова: геохимический мониторинг, химический анализ грунтов, степень засоления*

## Trends dynamics of the salt composition of the soil of the aeration zone of urban natural and technical systems on the example of the city of Dnipro

V. V. Fundovaya, T. P. Mokritskaya

*Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Dnipro, Ukraine, [vfundovai@gmail.com](mailto:vfundovai@gmail.com)*

Soil salinity is a characteristic feature of regions with dry and hot climates, where the evaporation processes dominate over the processes of infiltration. Salts in the solid phase of the soil occur almost everywhere, in all landscapes with lack of moisture. A large part of the structure there is a salt formed as a result of crystallization the evaporation of concentrated solutions of groundwater. They were formed under the influence of temporal and anthropogenic factors. The mineralization of the soil the individual areas is due to bring salts from the surrounding hills. A common cause of soil salinization is considered process salt weathering limestone, gypsum, halite and other types of rocks. Geochemical monitoring of the territory of the right bank of Dnepropetrovsk was performed in the period 1982 – 1990. Chemical analysis of the water-salt extracts the rocks of the aeration zone was executed. As a result of the processing of the data calculated the percentage salt content, determined by their type and degree of salinity. The regularities distributions of salts in the aeration zone were investigated in the study area. Mainly spread and the formation of saline soils is due to geological structure and composition of rocks, depth of occurrence and mineralization of groundwater, geomorphologic conditions, hydrogeological mode and climatic peculiarities. On the territory of the right bank of the river Dnepr were allocated areas of on three factors: geological structure, geomorphologic conditions, type of anthropogenic impact. In areas changes the salt composition of soils of aeration zone were analyzed in eight years the methods of statistical analysis. Also on the degree of salinity toxic salts analysis was carried out in residential and industrial areas, and re-analysis of eight years later. Analysis of the dynamics of water and salt regime of soils of aeration zone in the territory of the city a high level of natural and man-made system has shown that geomorphological zoning is fairly inert factor. It affects the state and variability of rock properties, even when subject to prolonged and intense anthropogenic influences.

*Keywords: geochemical monitoring, chemical analysis of soil, degrees of salinity*

**Введение.** Засоленные грунты – это грунты разного генезиса и свойств, которые содержат в себе легкорастворимые соли (хлориды, сульфаты, карбонаты натрия и калия), среднерастворимые (сульфат кальция – гипс) и труднорастворимые

(карбонаты магния и кальция). Легко- и среднерастворимые соли относятся к водорастворимым солям. Содержание в грунтах водорастворимых солей указывает на их степень засоленности. Состав тех или иных солей и их количество в грун-

тах зависит от генезиса самого грунта, тенденций современных геохимических процессов в грунтах. Формирование засоленных грунтов и их распространение в толще грунтов, главным образом, вызваны геологическим строением и составом горных пород, геоморфологическими условиями, глубиной залегания и минерализацией подземных вод, а также гидрогеологическим режимом и своеобразными климатическими условиями [Kovda, 1946].

Количество солей и их состав в грунтах выявляется путем химического анализа вытяжек, то есть как результат обработки проб грунта водой и различными кислотными растворами. Таким образом, легкорастворимые соли устанавливаются с применением пятикратной водной вытяжки, среднерастворимые – солянокислой вытяжкой с условием, что концентрация HCl – 0,2 н. раствора, труднорастворимые – солянокислой вытяжкой и кальциметрическим методом.

Знание засоленности грунтов, толщины слоя и условий их залегания необходимо для прогноза влияния воды на водорастворимую часть этих грунтов, оценки агрессивности засоленных грунтов по отношению к бетону и металлу, выявления физико-механических свойств грунтов, установления пригодности почв для сельскохозяйственных и других целей.

Особые свойства засоленных грунтов проявляются при их увлажнении и водонасыщении, а также при фильтрации воды. Известно, что соли NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при их содержании больше 13 % понижают прочность грунтов. Если в грунтах присутствует соль Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в количестве больше 13 %, грунты могут относиться к просадочным и являются сильно сжимаемыми [Predlozhenija po utocnieniu klassifikacii zasolennyh gruntov dlja dorozhnogo stroitel'stva, 1966]. Во-первых, в результате повышения влажности изменяются деформационные и прочностные свойства грунтов. Например, в засоленных грунтах при длительной фильтрации может увеличиться сжимаемость грунтов, в засоленных лессах и лессовидных суглинках может происходить дополнительная просадка (последующая деформация). Засоленные грунты при фильтрации воды могут подвергаться суффозии как химического типа (выщелачивание), так и механического, сопровождающегося выносом частиц. Во-вторых, солевые включения, растворяясь в подземных водах, увеличивают их агрессивность к строительным конструкциям [Zharova, Zharov, Imanov, 2007]. Влияние изменений хи-

мического состава поровых, капиллярных вод на свойства грунтов зоны аэрации изучено недостаточно.

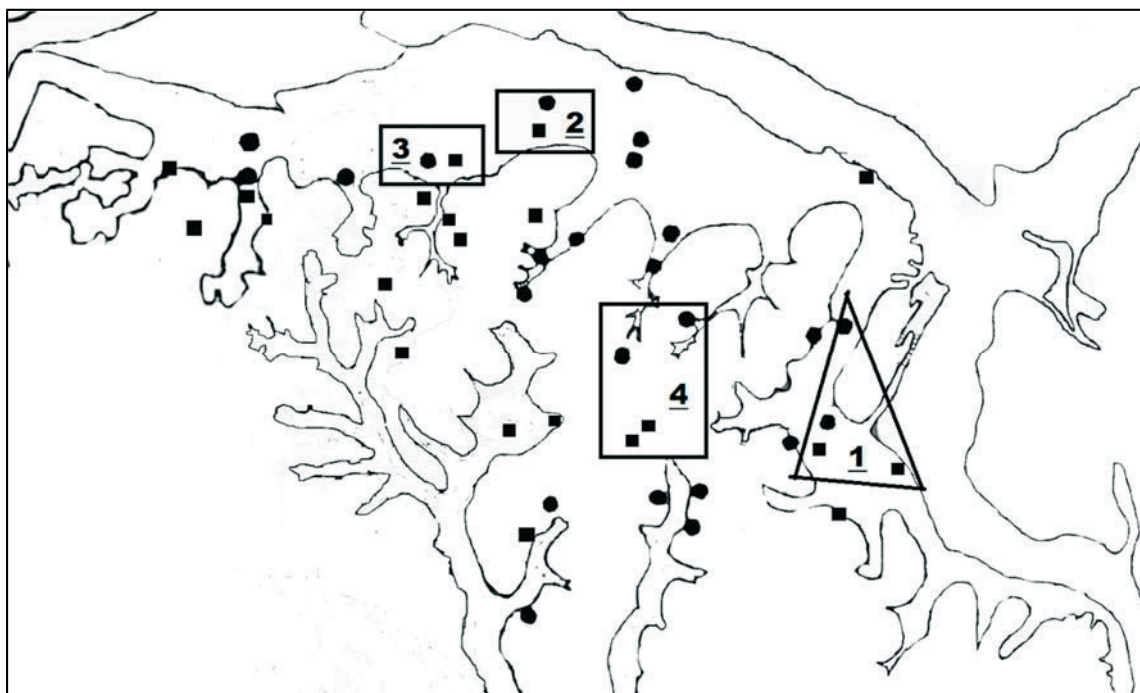
Фактических данных о степени изменения свойств грунтов зоны аэрации городских природно-технических систем в результате воздействия токсичных солей или изменения содержания солей недостаточно, в частности, из-за широкой распространенности лессовидных и лессовых грунтов в зоне влияния различных природно-техногенных систем Украины, поэтому изучение динамики их свойств как результата изменений солевого состава актуально.

Цель статьи – привести результаты анализа временной динамики химического состава, водно-физических свойств засоленных грунтов зоны аэрации на примере ключевых участков территории г. Днепропетровск с неодинаковым типом техногенных воздействий по данным 1981 – 1983 и 1989 – 1990 годы.

Материал и методы исследования. Для изучения изменений солевого состава грунтов зоны аэрации на застроенных территориях были привлечены отчеты объединения «Южкргеология». С целью проведения анализа изменений засоленности использованы данные водно-солевых вытяжек за 1981-1983 годы и 1989-1990 годы. [Archakova, Podafa, Ostash, 1981 – 1983]. Пробы грунта на водно-солевые вытяжки отбирались в зоне аэрации грунтов. Интервал отбора проб 0 – 0,1 м, 0,1 – 0,3 м, 0,3 – 0,5 м, 0,5 – 0,7 м, 0,7 – 1 м, 1 – 1,2 м, 1,2 – 1,5 м, 1,5 – 2 м и далее через 1 м. Схематично на рисунке 1 показано размещение скважин на исследуемой территории.

Данные мониторинга включают результаты определений состава водно-солевых вытяжек из грунтов зоны аэрации, отобранных из 26 скважин, пройденных в 1981 – 1983 годах, и из 22 скважин, пройденных в 1989 – 1990 годах. В комплекс показателей вошли: природная влажность грунта, pH, общая минерализация, содержание катионов (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) и анионов (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

**Результаты и их анализ.** Обработка результатов заключалась в расчете процентного содержания солей в каждой скважине, типизации условий, выборе ключевых участков и установления общих тенденций динамики солей. Расчет процентного содержания солей по каждой из скважин был выполнен по стандартной методике. Ниже приведен пример расчета содержания солей по материалам химического анализа водно-солевых вытяжек



**Рис. 1.** Распределение наблюдательных скважин на территории г. Днепр в масштабе 1 : 25 000  
 Условные обозначения: ● – скважины пройдены в 1982 г.; ■ – скважины пройдены в 1990 г.;  
 1 – 4 номера ключевого участка

грунта по скважине 151 (табл. 1). На первом этапе определялось содержание гидрокарбонатов, затем сульфатов и хлоридов. Затем выполнялся перерасчет содержания солей в процентах (табл. 2).

На территории правого берега г. Днепр были выделены четыре ключевых участка, отличающиеся по геоморфологическим, геологическим условиям и типу техногенного воздействия. Три участка расположены в пределах нижних аллювиальных террас р. Днепр, четвертый – на водораздельном плато. Первый участок расположен на сочленении первой и второй аллювиальных террас, второй и третий – на сочленении второй и третьей аллювиальных террас и их склонах. Первый, третий и четвертый участки расположены в пределах

зоны жилой застройки, второй – в пределах зоны влияния промышленных сооружений.

Анализ динамики солей выполнен по результатам определения водно-солевого режима пород зоны аэрации в соседствующих скважинах, пройденных в 1981 – 1983 годах и в 1990 году. Выполнен стандартный статистический анализ содержания солей с различной растворимостью: трудно растворимого гидрокарбоната кальция  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , растворимых сульфата натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и хлорида натрия  $\text{NaCl}$ . Совокупности результатов представляют собой выборки малого (участок 2, данные 1990 г.) и, в основном, среднего объема. Данные представительны, достоверны и позволяют установить тенденции динамики солевого режима по-

Таблица 1

**Результаты химического анализа водно-солевых вытяжек пород зоны аэрации на примере скважины № 151 (мг-экв)**

Номер скважины	Номер пробы	Карбонаты	Гидрокарбонаты	Сульфаты	Хлориды	Нитраты	Сумма анионов	Кальций	Магний	Калий и натрий	Сумма катионов
151	1	0	0,66	0,25	0,13	0	1,04	0,83	0,15	0,06	1,04

Таблица 2

**Содержание солей в пробе 1 скважины № 151 (%)**

Номер скважины	Номер пробы	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{Na}(\text{HCO}_3)$	$\text{CaSO}_4$	$\text{MgSO}_4$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{CaCl}_2$	$\text{MgCl}_2$	$\text{NaCl}$
151	1	63,46	–	–	16,35	7,69	–	–	6,73	5,77

род зоны аэрации в зоне влияния природно-техногенной системы высокого уровня.

По результатам описательного статистического анализа установлены следующие особенности динамики. Наибольшие расхождения среднего и медианы характерны для содержаний сульфата натрия, а наименьшие – для хлорида натрия. Выборки в целом неоднородны по коэффициенту вариации, асимметричны, эксцесс принимает аномально большие значения. Закономерности изменения содержания солей на ключевых участках определяются всеми тремя группами факторов.

Так, в пределах зоны городской застройки аллювиальных террас многоэтажными зданиями (ключевой участок 1) за относительно небольшой период времени произошло увеличение содержания всех солей на фоне роста однородности (по

коэффициенту вариации) (табл. 3, рис. 2). Увеличился эксцесс в распределении содержания солей с различной растворимостью  $\text{NaCl}$  и  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , а в распределении  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – уменьшился. Асимметрия резко возросла в распределении содержания хлорида натрия  $\text{NaCl}$ , уменьшилась существенно в четыре раза в распределении содержания бикарбоната натрия  $\text{Na}(\text{HCO}_3)$  и незначительно уменьшилась в распределении содержания сульфата натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Содержание солей в порах грунта в зоне влияния промышленной застройки (аллювиальная терраса) за исследуемый период резко изменилось (рис. 3). Тенденции изменений средних и показателей неоднородности распределений сульфата натрия и бикарбоната кальция имеют один знак, а хлорида натрия – противоположны и существенно отличаются.

Таблица 3

### Сравнительный статистический анализ (участок 1)

Год	Соль	Объем выборки	Среднее	Медиана	Дисперсия	Коэффициент вариации	A	Стандартная ошибка A	Э	Стандартная ошибка Э
1982	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	30	35,06	31,22	306,11	49,9	0,32	0,43	-0,97	0,83
1990		45	44,67	43,57	299,98	38,77	0,08	0,35	-1,19	0,69
1982	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	30	8,52	4,69	104,47	120	1,38	0,43	2	0,83
1990		45	12,47	9,38	178,74	107,25	1,18	0,35	1,17	0,69
1982	$\text{NaCl}$	30	10,79	9,7	42,7	60,59	0,27	0,43	-0,65	0,83
1990		45	16,55	15,87	58,31	46,14	0,94	0,35	0,94	0,69

Примечание: A – асимметрия; Э – эксцесс.

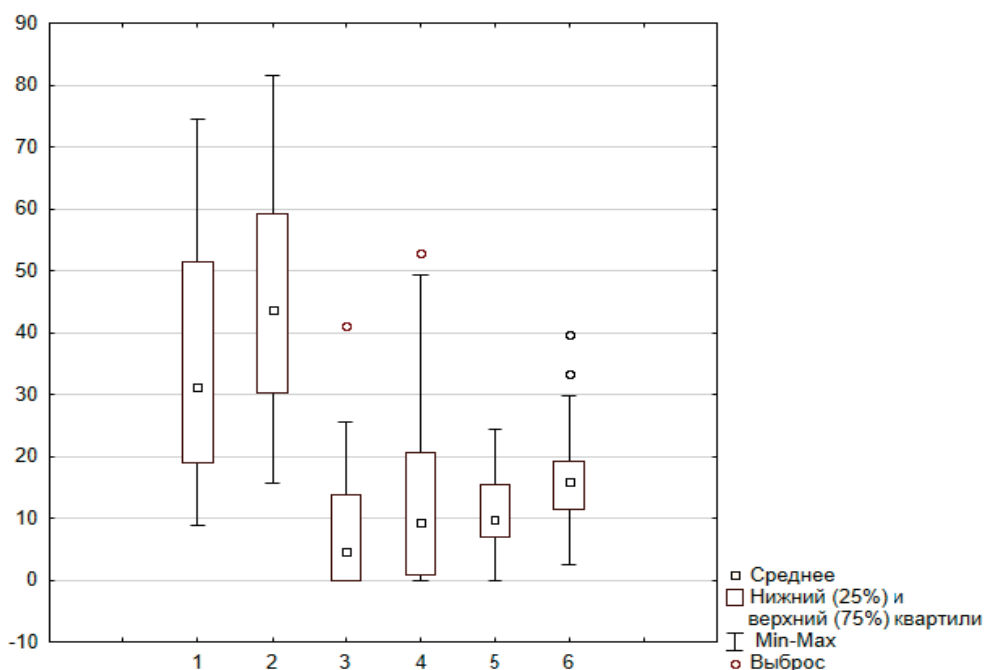
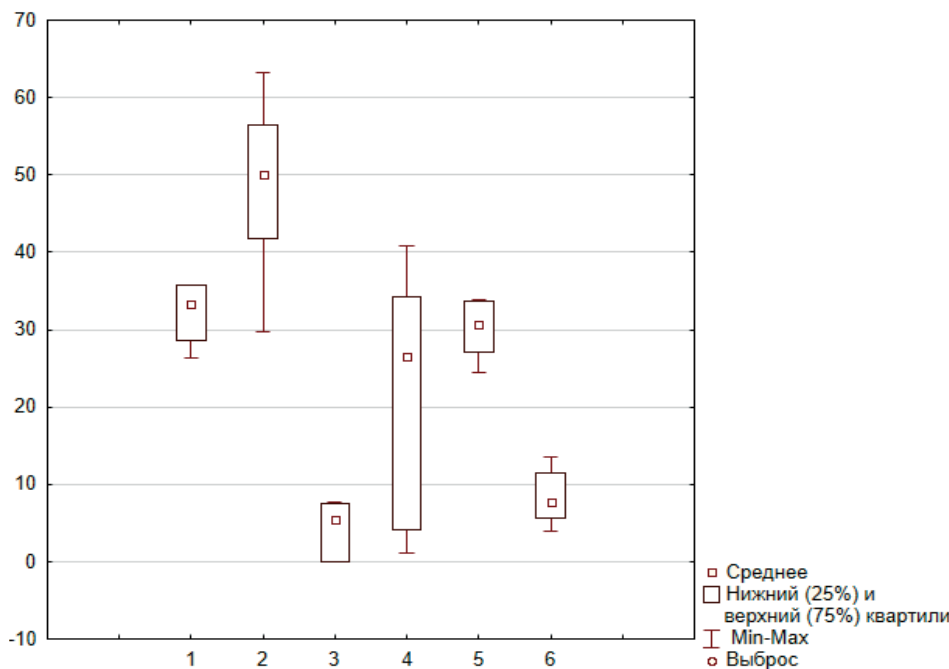


Рис. 2. Диаграммы размаха изменения содержания  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaCl}$  (ключевой участок 1):

по оси ординат приведено содержание соли; по оси аргументов указаны наименование соли и дата проведения отбора проб: 1 –  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , 1982 г.; 2 –  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , 1990 г.; 3 –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 1982 г.; 4 –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 1990 г.; 5 –  $\text{NaCl}$ , 1982 г.; 6 –  $\text{NaCl}$ , 1990 г.



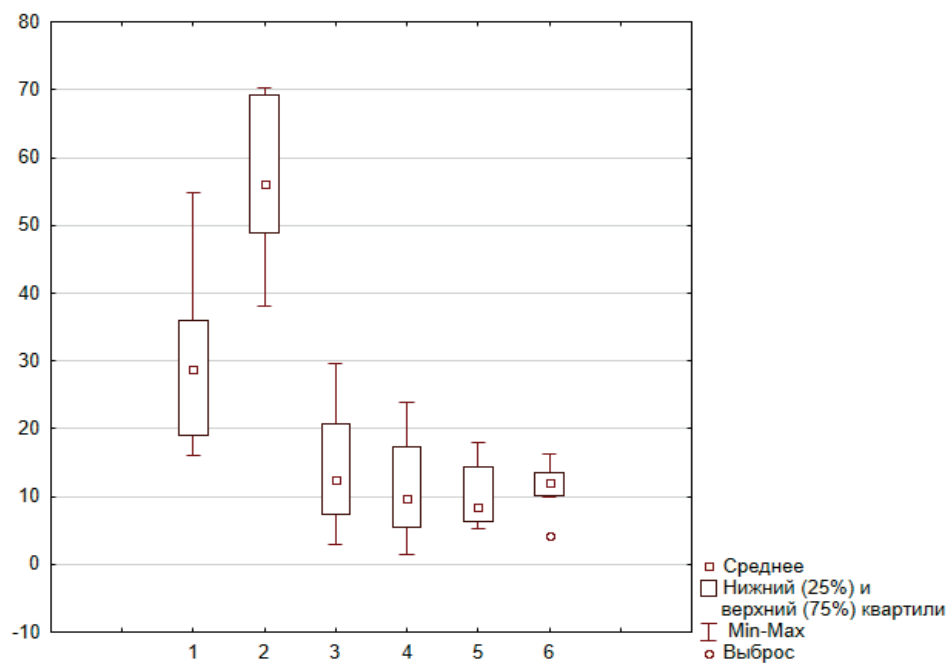
**Рис. 3.** Диаграммы размаха изменения содержания Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и NaCl (ключевой участок 2): по оси ординат приведено содержание соли; по оси аргументов указаны наименование соли и дата проведения отбора проб: 1 – Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 1982 г.; 2 – Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 1990 г.; 3 – Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1982 г.; 4 – Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1990 г.; 5 – NaCl, 1982 г.; 6 – NaCl, 1990 г.

В границах третьего участка (аллювиальная терраса, жилая застройка), тенденции динамики солей сходные с описанными выше (участок 2), но интенсивность их слабее (рис. 4.)

Тенденции изменения солевого режима в зоне жилой застройки определяются геоморфологическим строением, но состав солей соответствует не полностью (табл. 4, рис. 5). На плато также уменьшается среднее по разрезу содержание хлорида натрия и увеличивается содержание бикарбоната кальция. Рост средних содержаний сопровожда-

ется закономерным увеличением вариативности и ростом асимметричности распределений.

В целом изменение водно-солевого режима грунтов зоны аэрации выражается в увеличении содержания труднорастворимых солей, которое сопровождается уменьшением вариативности в зонах жилой застройки независимо от геоморфологической зональности. В зоне влияния промышленных сооружений произошли наибольшие изменения абсолютных содержаний растворимых солей, при этом количество сульфатов увеличи-



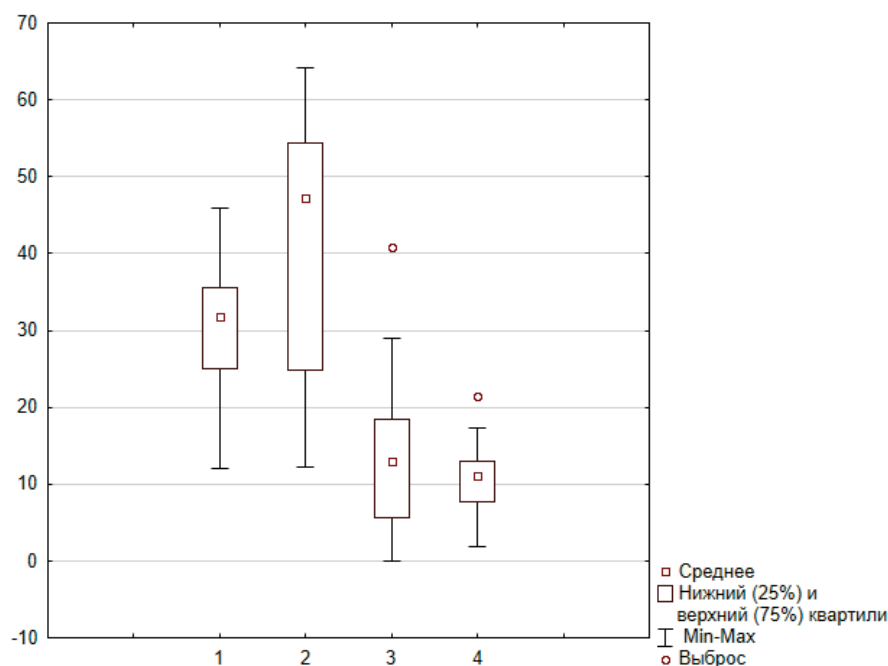
**Рис. 4.** Диаграммы размаха изменения содержания Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Mg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и NaCl (ключевой участок 3): по оси ординат приведено содержание соли; по оси аргументов указаны наименование соли и дата проведения отбора проб: 1 – Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 1982 г.; 2 – Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 1990 г.; 3 – Mg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1982 г.; 4 – Mg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1990 г.; 5 – NaCl, 1982 г.; 6 – NaCl, 1990 г.



## Сравнительный статистический анализ (участок 4)

Год	Соль	Объем выборки	Среднее	Медианна	Дисперсия	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации	А	Стандартная ошибка А	Э	Стандартная ошибка Э
1982	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	36	30,95	31,89	76,11	8,72	28,19	-0,37	0,39	-0,21	0,77
1990		23	42,22	47,15	229,32	15,14	35,86	-0,36	0,48	-1,02	0,93
1982	NaCl	36	13,47	12,94	80,63	8,98	66,68	0,79	0,39	1,00	0,77
1990		23	10,53	11,11	22,12	4,70	44,66	0,18	0,48	0,11	0,93

Примечание: А – асимметрия; Э – эксцесс

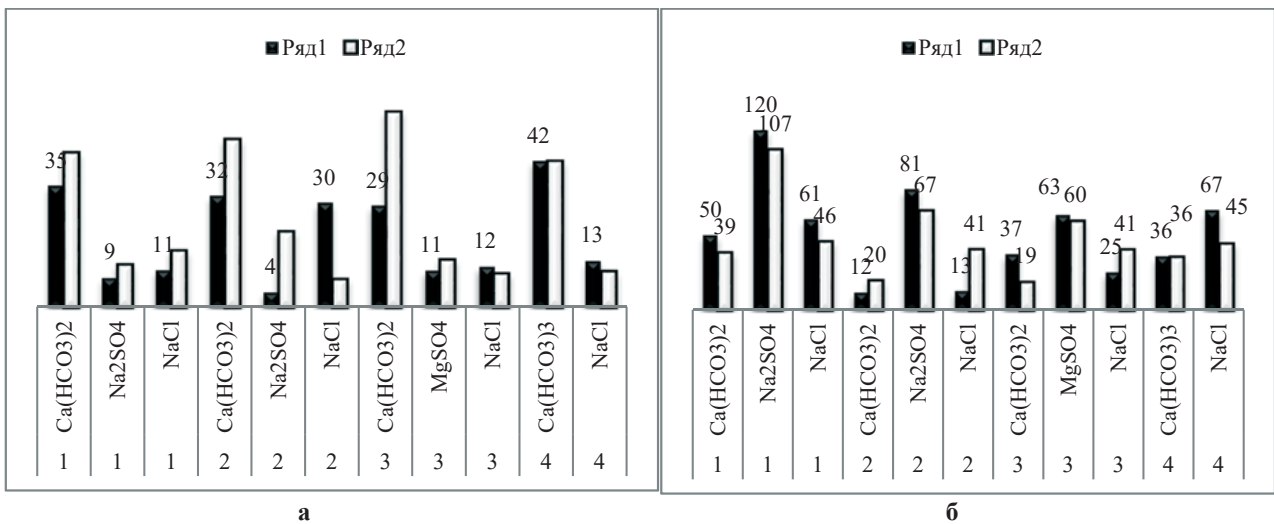


**Рис. 5.** Диаграммы размаха изменения содержания Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и NaCl (ключевой участок 4): по оси ординат приведено содержание соли; по оси аргументов указаны наименование соли и дата проведения отбора проб: 1 – Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 1982 г.; 2 – Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 1990 г.; 3 – NaCl, 1982 г.; 4 – NaCl, 1990 г.

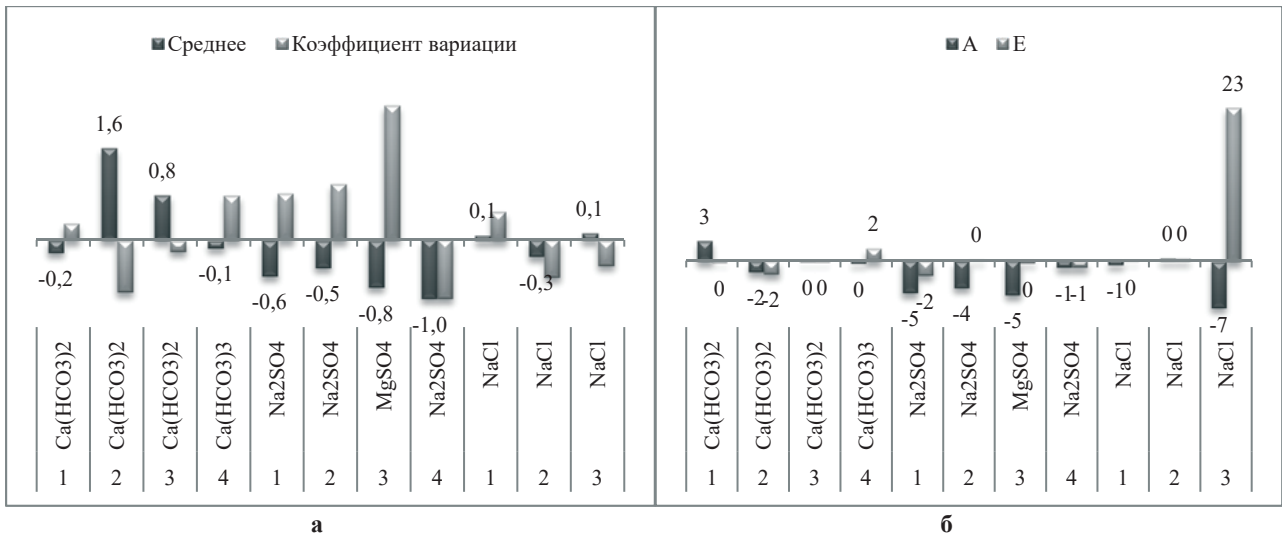
лось, а хлоридов уменьшилось. Зависимость между приростом средних и вариативностью обратная (рис. 6).

Относительные приращения средних содержаний, коэффициента вариации, асимметрии и эксцесса не всегда подчиняются зональности, определяемой типами техногенеза и природных условий. Уменьшение средних содержаний труднорастворимых солей, выраженное в долях от начальных средних содержаний, произошел на участках 2 и 3. На участках 1 и 4 произошло увеличение средних содержаний относительно начальных значений, определенных в 1982 году. Содержания растворимых солей изменяются различно. Количество сульфатов увеличивается повсеместно, как и их вариативность, а хлоридов – только в зоне влияния промышленных сооружений. Асимметричность распределения хлоридов натрия на участке 3 может быть также связана с действием локальных (техногенных) факторов в зоне жилой застройки (рис. 7).

Изменения солевого режима являются фактором изменения сжимаемости, прочности, набухания и просадочности дисперсных грунтов. Известно [Predlozhenija po utocnenuju klassifikacii zasolennyh gruntov dlja dorozhnogo stroitel'stva, 1966], что избыточное содержание сульфата натрия присуще просадочным грунтам и грунтам с повышенной сжимаемостью. Значительное увеличение содержания легкорастворимых солей способствует снижению прочности, а хлорида натрия – дополнительно приводит к уменьшению пористости. Поэтому можно предположить, что повсеместное увеличение содержания сульфатов может приводить к повышению сжимаемости и просадочности лессовидных суглинков, слагающих зону аэрации как на террасах р. Днепр, так и в границах водораздельного плато в связи с увеличением гидрофильности. В зоне техногенных воздействий от промышленных сооружений вероятно ухудшение проницаемости лессовидных суглинков, что будет



**Рис. 6.** Статистики содержания солей в грунтах зоны аэрации: а – средние значения; б – коэффициенты вариации: ряд 1 – статистики рассчитаны по данным 1982 г.; ряд 2 – статистики рассчитаны по данным 1990 г.; 1, 2, 3, 4 – номера ключевого участка; Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> – статистика рассчитана по результатам расчета содержания соли гидрокарбоната кальция в грунтах зоны аэрации



**Рис. 7.** Относительные приращения статистик содержания солей на ключевых участках (1982–1990 гг.): а – средние содержания солей и коэффициенты вариации на участках 1 – 4; б – асимметрия и эксцесс

способствовать изменению их состояния. В районах жилой застройки вероятно увеличение проницаемости на фоне повышения сжимаемости и снижение прочности лессовидных суглинков.

**Выводы.** Анализ динамики водно-солевого режима грунтов зоны аэрации на территории городской природно-техногенной системы высокого уровня показал, что геоморфологическая зональность является довольно инертным фактором, влияющим на состояние и изменчивость свойств пород даже при условии длительных и интенсивных техногенных воздействий.

В зонах влияния промышленных и жилых сооружений происходят направленные изменения водно-солевого режима зоны аэрации, способствующие развитию дополнительных деформаций грунтов, которые не учитываются в практике проектирования.

#### Библиографические ссылки

Archakova, E.G., Podafa, V.A., Ostash, E.S. 1981-1983. Otchet o rezul'tatah robot po yzuchenyju ekzogennykh geologicheskikh processov na ter-

- rytoryy g. Dnepropetrovska [Report on the results of studies on the exogenous geological processes on the territory of Dnepropetrovsk]. Yuzhukrgeologiya, Novomoskovsk GRE, Dnepropetrovsk (in Russian).
- Zharova, S.S., Zharov, S.V., Imanov, M.O. 2007. K problemam proektirovanija i stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij na zasolennyh gruntah [The problems of the design and construction of buildings and structures in saline soils]. Retrieved from [http://www.rusnauka.com/Page\\_ru.htm](http://www.rusnauka.com/Page_ru.htm) (in Russian).
- Kovda, V.A. 1946. Proishozhdenie i rezhim zasolennyh pochv [The origin and saline soils mode]. Volume 1. USSR Academy of Sciences, Moscow, St. Petersburg (in Russian).
- Lopatovskaja, O.G., Sugachenko, A.A. 2010. Melioracija pochv. Zasolennye pochvy [Soil Reclamation. Salty soils]. Irkutsk, Irkutsk State University, 123 (in Russian).
- Predlozhenija po utocnenuju klassifikacii zasolennyh gruntov dlja dorozhnogo stroitel'stva [Proposals on clarifying classification of saline soils for road construction]. Moscow, SoyuzdorNII, 1966, 13 (in Russian).

*Поступила в редколлегию 17.10.2016*