

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО  
ГОСПОДАРСТВА ІМ. О.М. БЕКЕТОВА  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**СЕРІКОВА ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА**

УДК 502.171:556(477)(043.5)

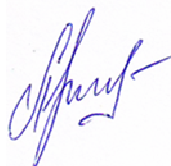
ДИСЕРТАЦІЯ

**ПРОГНОЗУВАННЯ І УПРАВЛІННЯ РІВНЕМ ҐРУНТОВИХ ВОД ДЛЯ  
ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЗАБУДОВАНИХ  
ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека  
Галузь знань – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Серікова О.М.

Науковий керівник Яковлев Валерій Володимирович, д-р. геол. наук,  
професор

Харків – 2019

## АНОТАЦІЯ

***Серікова О.М.* Прогнозування і управління рівнем ґрунтових вод для підвищення екологічної безпеки забудованих територій України – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. – Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків, 2019.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04. Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, Суми, 2019.

Дисертація присвячена актуальній проблемі підтоплення ґрунтовими водами урбанізованих територій. Підтоплення територій не тільки негативно впливає на життєдіяльність населення, а і може привести до виникнення екологічних катастроф та значних матеріальних збитків.

Метою досліджень є підвищення рівня екологічної безпеки урбанізованих територій, що зазнають підтоплення ґрунтовими водами, шляхом наукового обґрунтування методів та засобів прогнозування та управління підтопленням.

У роботі проведено кількісне визначення впливу різних чинників на величину додаткового живлення у межах селітебних і промислових міських територій. Охарактеризовано природні і техногенні фактори, що призводять до підвищення рівня ґрунтових вод міських територій. Враховувались такі техногенні чинники поповнення ґрунтових вод, як втрати води з систем водопостачання та водовідведення міст, втрати води з теплових мереж. Досліджено та встановлено, що втрати з водних комунікацій є ключовим чинником додаткового живлення, яке призводить до підтоплення міст.

Вперше визначені крайові умови математичної моделі зміни рівня ґрунтових вод, що враховують вплив штучних покриттів поверхні ґрунту і

евапотранспірацію для вдосконалення прогнозів та управління рівнем ґрунтових вод забудованих територій. При моделюванні зміни рівня ґрунтових вод було розглянуто типові ділянки міської території, частково покриті штучними покриттями на поверхні ґрунту, де вплив природних і техногенних факторів відбувається тільки на вільній поверхні цих ділянок. Зроблено прогноз максимально високого рівня ґрунтових вод в умовах природно-техногенних геосистем великих міст на прикладі м. Харків. Для підвищення рівня екологічної безпеки міст України, обґрунтовано заходи оптимізації водного балансу ґрунтових вод шляхом регулювання основних режимоутворюючих факторів: зменшення втрат з водних комунікацій; збільшення водовідбору з водоносних горизонтів, гідравлічно зв'язаних з ґрунтовими водами; штучного відтоку ґрунтових вод за рахунок дренажів, що створюються при новому будівництві.

Науково обґрунтовано та експериментально встановлено період з найменшим проявом природних факторів для виявлення величини техногенного додаткового живлення ґрунтових вод.

Запропоновано інженерний захід для захисту об'єктів нового будівництва від шкідливої дії ґрунтових вод, що передбачає встановлення протифільтраційної завіси вздовж фундаменту будівлі.

Удосконалено теоретико-методологічні основи управління рівнем ґрунтових вод, які включають типову схему функцій органів управління та завдань попередження і ліквідації наслідків підтоплення, алгоритм дій у ході моніторингу за рівнем ґрунтових вод на підтоплених і потенційно підтоплених територіях та Проект комплексу заходів з попередження розвитку підтоплення міської території великих міст України з урахуванням європейського досвіду.

**Ключові слова:** екологічна безпека, техногенний вплив, рівень ґрунтових вод, підтоплення, додаткове живлення, математичне моделювання зміни рівня ґрунтових вод, прогнозування зміни рівня ґрунтових вод, протифільтраційна завіса.

***Наукові праці, в яких опубліковані наукові результати дисертації***

1. Серикова Е. Н., Яковлев В. В. Дополнительная инфильтрация в подземные воды на территории крупных городов (на примере г. Харькова). *Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов»*. 2011. №97. С. 344–348.
2. Серикова Е. Н., Яковлев В. В. Роль управленческих методов в предотвращении подтопления городов. *Научный вестник строительства*. 2012. № 68. С. 382–387.
3. Серикова Е. Н. Математическое моделирование повышения уровня грунтовых вод под воздействием дополнительной инфильтрации. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 6/4. С. 26–33.
4. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А. Изучение особенностей изменения уровня грунтовых вод с помощью математического моделирования. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 3/4. С. 31–35.
5. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А., Яковлев В. В. Математическое моделирование изменения уровней грунтовых вод в городах с учетом ведущих режимобразующих факторов. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2014. № 4 (51). С. 182–191.
6. Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Яковлев В. В. Додаткове живлення підземних вод у великих містах України на прикладі міста Харкова. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. 2016. № 130. С. 13–18.
7. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А. Изменение уровня грунтовых вод в городской экосистеме г. Харькова. *Вісник НТУ«ХПИ»*. 2016. № 4 (1176). С. 132–137.
8. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical Model of Dangerous Changing the Groundwater Level in Ukrainian Industrial Cities.

*Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. 2015. Vol. 1, № 2. P. 86–90.

9. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City. *International Journal of Development Research*. 2015. Vol. 5, Issue 12. P. 6236–6240.

10. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А., Яковлев В. В., Анищенко Л. Я., Писня Л. А. Оценка адекватности предлагаемой математической модели прогноза на фактических данных мониторинга уровня грунтовых вод в центральной части г. Харькова. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2017. № 11 (40). С. 43–47.

11. Серикова Е. Н., Свиренко Л. П. Снижение норм водопотребления как фактор энергосбережения. *Всеукраинский научно-технический журнал "Энергосбережение"*. 2010. № 3. С. 31–32.

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

12. Серикова Е. Н., Свиренко Л. П. Снижение норм водопотребления в г. Харькове: перспективы и оценка последствий. *II International Water Forum Aqua Ukraine*. (Киев, 21–23 сентября 2004). Киев, 2004. С. 315–316.

13. Serikova O., Chaliy D. Environmental and Economic Aspects of Water Metering Implementation (Kharkiv Region). *12<sup>th</sup> International Student Conference "Economics for Ecology"*. (Sumy, 3–7 May 2006). Sumy, Ukraine, 2006. P. 177–178.

14. Serikova O. Svirenko L. Changeover to European Standards of Portable Water Consumption as a Factor of Power Saving. *Proceedings of VI International Yourth Environmental Forum "Ecobaltica`2006"*. (St. Petersburg, 27–29 June 2006). St. Petersburg, Russia, 2006. P. 169–170.

15. Sierikova O., Yakovlev V. Quality Indexes of Ground Water at Zmiev District of Kharkiv Region. *Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Technologies for Waste and Wastewater Treatment. Eco-Tech 2007*. (Kalmar, 26–28 November). Kalmar, Sweden, 2007. P. 449–455.

16. Sierikova O., Yakovlev V. Water Supply Crisis and Reservation of Drinking Water: a Tactical and Strategic Approach. *Proceedings of International Yourth Science Environmental Forum "Ecobaltica`2008"*. (St. Petersburg, 26–28 June 2008) St. Petersburg, Russia, 2008. P. 285–289.

17. Серикова Е. Н., Свиренко Л.П. Прогноз изменения уровня грунтовых вод на городских территориях на основе ретроспективного анализа ландшафтных условий. *Материалы 2й всеукраинской студенческой научно-технической конференции «Устойчивое развитие городов»*. (Харьков, 12–14 мая 2009 г.). Ч.2. Харьков, 2009. С. 138–139.

18. Sierikova O., Yakovev V. Additional infiltration to underground waters of big cities territory (on example Kharkiv region). *Proceedings of International Conference on Natural Sciences and Technologies. Linnaeus ECO-TECH'10*. (Kalmar, 22–24 November 2010). Kalmar, Sweden, 2010. P. 693–695.

19. Sierikova O., Yakovlev V. Using a Mathematical Model to Evaluate the Economic and Environmental Damage Caused by the Flooding. *Матеріали XIX Міжнародної наукової конференції «Економіка для екології»*. (Суми, 30 квітня – 3 травня 2013 р.). Суми, 2013. С.164–166.

20. Серикова Е. Н. Математическое моделирование повышения уровня грунтовых вод под воздействием дополнительной инфильтрации. *Сборник статей VII Международной научно-технической конференции молодых специалистов, аспирантов и студентов «Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем»* - (Пенза, 28–31 мая 2013 г.). Россия, г. Пенза, 2013. С. 199–202.

21. Серикова Е. Н., Яковлев В. В. Использование математического моделирования для оптимизации баланса подземных вод. *Materiály X mezinárodní vědecko-praktická konference «Moderní využitosti vědy – 2014»*. (Praha, 27.01. –05.02.2014). Díl 30. Praha, 2014. P. 18–20.

22. Serikova E., Strelnikova E. Critical Changing Groundwater Level in Ukrainian Industrial Cities. *Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції «Економіка для екології»*. (Суми, 6–7 травня 2015 р.). Суми, 2015. С. 87–90.

23. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А. Математическое моделирование изменения уровня грунтовых вод под воздействием техногенных факторов городской среды *Збірник тез доповідей XIII міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки»*. (Кременчук, 6–7 жовтня 2015 р.). м. Кременчук, 2015. С.58.

#### ABSTRACT

**Sierikova O.M. The groundwater level forecasting and management for increasing the ecological safety of the built up territories of Ukraine.** – Qualifying scientific work on the manuscript right.

Thesis for the academic degree of the Candidate of Engineering Science in specialty 21.06.01 – Ecological Safety. O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, 2019.

The thesis defense will be held at the Specialized Academic Council D55.051.04 meeting. Sumy State University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2019.

Thesis treats the crucial issue concerned with groundwater flooding of urban territories. Flooding of the territories not only negatively affects the population vital activity. It also could lead to environmental disasters and significant material damage.

The purpose has been to improve environmental safety of urban territories flooded by groundwater through the scientific substantiation of methods and technics of flood forecasting and management.

The quantitative determination of the various factors influence on the additional groundwater replenishment value within residential and industrial urban areas has been specified in the thesis. The natural and technogenic factors that lead to groundwater level increasing of urban areas have been characterized. The follow technogenic factors have been estimated: the cities losses from water supply and sewage systems, losses from heat networks. It has been treated and established that the water communications losses are the key factor of additional groundwater replenishment which leads to city flooding.

For the first time, the boundary conditions of the groundwater level changing mathematical model have been specified. Mathematical model takes into account artificial coverings on the soil surface and groundwater discharge processes due to evapotranspiration to improve predictions and management of groundwater level on the built-up areas. In simulating process of the groundwater level changes, it has been treated the typical plots of urban territory, which partially covered with artificial coverings on the soil surface, where the influence of natural and technogenic factors only occurs on the free surface of these plots. The forecast of maximum groundwater level rise variant in natural and technogenic geosystems conditions of large cities has been developed on the Kharkiv city example. Measures to optimize the water balance of the groundwater by taking into account the technogenic factors affecting groundwater have been proposed. There are reducing losses from water communications; increase of water intake from aquifers hydraulically bound to groundwater; an artificial outflow of groundwater by the drainage expense created during the new building in the water balance optimization strategy.

Scientifically has been grounded and experimentally established a period with the smallest natural factors manifestation for the value detection of technogenic additional groundwater replenishment.

The engineering measure has been proposed for the new building objects protection from the groundwater harmful effects, which involves the installation of the anti-filtration curtain along the foundation of the building.

The flood prevention system has been developed and specified, includes typical scheme of the management functions and tasks for preventing and mitigating the flooding consequences, the actions algorithm during groundwater levels monitoring in flooded and potentially flooded areas, and the Project of measures set to prevent the flooding of urban areas in large cities of Ukraine on the basis of European experience.

**Keywords:** environmental safety, technogenic influence, groundwater level, flooding, additional groundwater replenishment, mathematical modeling of



groundwater level changing, groundwater level changing prediction, anti - filtration curtain.

**Scientific papers, in which the scientific results of the dissertation are published:**

1. Sierikova, E.N., Yakovlev, V.V. Additional infiltration to groundwater of big cities territory (for example Kharkiv regione). *Municipal Economy of Cities*. 2011. № 97 P. 344-348.
2. Sierikova, E.N., Yakovlev, V.V. The role of manage techniques in the cities flooding prevention. *Scientific Bulletin of the Construction*. 2012. № 68. P. 382-387.
3. Sierikova E.N. Mathematical modeling of the groundwater level rising under the influence of additional infiltration. *Easten-European Jornal of Enterprise technologies*. 2012. № 6/4 (60). P. 26-33.
4. Serikova E.N., Strelnikova E.A. The treatment of groundwater level changing characteristics via the mathematical modeling. *Eastern European Jornal of Enterprise Technologies*. 2013. № 3/4. P. 31-35.
5. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical modeling of groundwater level changes in cities taking into account the leading regime-forming factors. *Bulletin of Kherson National Technical University*. 2014. № 4 (51). P. 182–191.
6. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Additional groundwater replenishment in the large cities of Ukraine on the Kharkiv city example. *Urban management of cities*. 2016. № 130, P. 13–18.
7. Serikova E.N., Strelnikova E.A. Groundwater level changes in the Kharkiv urban ecosystem. *Bulletin of the NTU "KhPI"*. 2016. № 4 (1176). P.132–137.
8. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical model of dangerous changing the groundwater level in Ukrainian industrial cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. 2015. Vol. 1. Issue 2. P. 86–90.

9. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. The programme of measures to prevent flooding on the built-up areas on example of Kharkiv city. *International Journal of Development Research*. 2015. Vol. 5. Issue 12. P. 6236–6240.

10. Serikova E.N., Strelnikova E.A., Yakovlev V.V., Anishenko L.Y., Pisnya L.A. Evaluation of the adequacy of proposed prediction mathematical model on the actual data of groundwater level monitoring in the central part of Kharkiv city. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2017. № 11 (40). P. 43-47.

11. Serikova, E.N., Svirenko L.P. The water consumption reducing as the energy saving factor. *All-Ukrainian scientific and technical journal "Energy Saving"*. 2010. № 3. P. 31–32.

**Scientific papers, which testify to the approbation of the materials of the dissertation:**

12. Serikova E.N., Svirenko L.P. The prospects and impact assessment of the water consumption reducing in Kharkiv. *II International Water Forum Aqua Ukraine*. (Kiev, 21–23 September 2004). Kiev, 2004. P. 315–316.

13. Serikova O., Chaliy D. Environmental and economic aspects of water metering implementation (Kharkiv region). *12<sup>th</sup> International Student Conference "Economics for Ecology"*. (Sumy, 3–7 May 2006). Sumy, 2006. P. 177–178.

14. Serikova O. Svirenko L. Changeover to european standards of portable water consumption as a factor of power saving. *Proceedings of VI International Yourth Environmental Forum "Ecobaltica`2006"*. (St. Petersburg, 27–29 June 2006). St. Petersburg, Russia, 2006. P. 169–170.

15. Sierikova O., Yakovlev V. Quality indexes of ground water at Zmiev district of Kharkiv region. *Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Technologies for Waste and Wastewater Treatment. Eco-Tech 2007*. (Kalmar, 26–28 November 2007). Kalmar, Sweden, 2007. P. 449–455.

16. Sierikova O., Yakovlev V. Water supply crisis and reservation of drinking water: a tactical and strategic approach. *Proceedings of International Yourth Science Environmental Forum "Ecobaltica`2008"*. (St. Petersburg, 26–28 June 2008) St. Petersburg, Russia, 2008. P. 285–289.

17. Serikova E., Svirenko L. The groundwater level changes forecast of the urban areas based on the retrospective analysis of landscape conditions. *Proceedings of the 2nd All-Ukrainian Student Scientific and Technical Conference "Sustainable Urban Development"*. (Kharkiv, 12–14 May 2009). V.2. Kharkiv, 2009. P. 138–139.
18. Sierikova O., Yakovev V. Additional infiltration to underground waters of big cities territory (on example Kharkiv region). *Proceedings of International Conference on Natural Sciences and Technologies. Linnaeus ECO-TECH'10*. (Kalmar, 22–24 November 2010). Kalmar, Sweden, 2010. P. 693–695.
19. Sierikova O., Yakovlev V. Using a mathematical model to evaluate the economic and environmental damage caused by the flooding. *19<sup>th</sup> International Student Conference "Economics for Ecology"* (Sumy, 30 April – 3 May 2013). Sumy, 2013. P. 164–166.
20. Serikova E. Mathematical modeling of the groundwater level rising under the influence of additional infiltration. *Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference of young specialists, graduate students and students "Mathematical and computer modeling of natural science and social problems"*. (Penza, 28–31 May 2013). Penza, Russia, 2013. P. 199–202.
21. Serikova E., Yakovlev V. Using mathematical modeling to optimize the groundwater balance. *Materiály X mezinárodní vědecko-praktická konference «Moderní vymoženosti vědy – 2014»*. (Praha, 27 January – 5 February 2014). Díl 30. Praha, 2014. P. 18–20.
22. Serikova E., Strelnikova E. Critical changing groundwater level in Ukrainian industrial cities. *21<sup>th</sup> International Student Conference "Economics for Ecology"* (Sumy, 6–7 May 2015). Sumy, 2015. P. 87–90.
23. Serikova E., Strelnikova E. Mathematical modeling of groundwater level changes under the impact of urban environment technogenic factors. *Abstracts collection of the XIII International Scientific and Technical Conference "Problems of Environmental Safety"*. (Kremenchug, 6–7 October 2015). Kremenchug, 2015. P. 58.

## ЗМІСТ

	С.
Перелік умовних позначень, символів, одиниць скорочень і термінів ....	15
Вступ .....	18
Розділ 1 Сучасний стан екологічної безпеки міських територій, що зазнають підтоплення .....	24
1.1 Тенденції розвитку підтоплення у регіонах світу та України.....	24
1.2 Аналіз даних науково-технічної літератури щодо екологічної безпеки територій, які підтоплюються .....	29
1.3 Чинники та фактори підтоплення міських територій .....	32
1.4 Аналіз методів моделювання при вирішенні гідрогеологічних завдань екологічного напрямку .....	37
1.5 Аналіз наслідків підтоплення міських територій .....	38
1.5.1 Екологічні наслідки підтоплення міських територій .....	38
1.5.2 Соціально-економічні наслідки підтоплення .....	39
1.6 Боротьба з підтопленням в Україні і в світі .....	40
1.6.1 Аналіз Європейського досвіду боротьби з підтопленням .....	40
1.6.2 Аналіз досвіду України в боротьбі з підтопленням .....	43
1.6.3 Роль інженерних заходів в боротьбі з підтопленням на урбанізованих територіях .....	47
1.7 Аналіз існуючих рішень та проблем щодо боротьби з підтопленням .	47
1.8 Постановка завдань дослідження .....	51
Розділ 2 Характеристика об'єкта та опис методів дослідження .....	53
2.1 Характеристика об'єкта дослідження .....	53
2.2 Методика дослідження впливу техногенних чинників на величину додаткового живлення ґрунтових вод міських територій .....	57

	13
2.3 Методика оптимізації статей водного балансу ґрунтових вод .....	61
2.4 Методи математичного моделювання зміни рівня ґрунтових вод забудованих територій .....	63
2.4.1 Диференціальні рівняння фільтрації .....	63
2.5 Методи математичного моделювання протифільтраційних завіс .....	72
2.6 Висновки до другого розділу .....	74
Розділ 3 Дослідження змін рівня ґрунтових вод забудованої території на прикладі м. Харків та їх екологічно значимі наслідки .....	76
3.1 Дослідження зміни рівня ґрунтових вод в точці А .....	77
3.2 Дослідження зміни рівня ґрунтових вод в точці Б .....	83
3.3 Дослідження зміни рівня ґрунтових вод в точці В .....	91
3.4 Висновки до третього розділу .....	102
Розділ 4 Математичне моделювання зміни рівня ґрунтових вод під впливом техногенних факторів .....	103
4.1 Математичне моделювання зміни рівня ґрунтових вод під впливом додаткового живлення .....	103
4.2 Розв'язання крайової задачі щодо зміни рівня ґрунтових вод з урахуванням провідних режимоутворюючих факторів, за відсутності евапотранспірації .....	109
4.3 Розв'язання крайової задачі щодо зміни рівня ґрунтових вод з урахуванням евапотранспірації .....	113
4.4 Аналіз результатів числового розрахунку .....	116
4.5 Оцінка адекватності математичної моделі фактичним даним досліджень зміни РГВ .....	121
4.6 Висновки до четвертого розділу .....	123
Розділ 5 Попередження підтоплення та підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій великих міст .....	124
5.1 Інженерний захист автодоріг від шкідливої дії підземних вод для	124

попередження екологічно небезпечних явищ .....	
5.2 Система попередження підтоплення забудованої території на прикладі м. Харкова .....	126
5.3 Проект комплексу заходів, щодо запобігання підтопленню та екологічно небезпечним явищам .....	129
5.4 Рекомендації щодо попередження підтоплення та підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій великих міст .....	130
5.5 Висновки до п'ятого розділу .....	135
Висновки .....	136
Перелік використаних джерел .....	138
Додатки .....	151

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

Скорочення

РГВ	– рівень ґрунтових вод
ДБН	– державні будівельні норми
ЕГП	– екзогенні геологічні процеси
СПАР	– синтетичні поверхнево-активні речовини
ГДК	– гранично-допустима концентрація

Умовні позначення, символи

$V_x, V_y, V_z$	– компоненти вектору швидкості фільтрації відповідно декартових осей координат $OX, OY, OZ$ , де $OZ$ — вертикальна вісь;
$t$	– час, с;
$a$	– коефіцієнт пьезопроводності або рівнепроводності залежно від типу фільтраційного потоку;
$x, y, z$	– декартові координати, причому $z$ по вертикалі;
$r$	– горизонтальна циліндрична координата;
$h_i$	– фільтраційний напір у $i$ -тому шарі, м;
$\gamma_i$	– коефіцієнт анізотропії для $i$ -того шару;
$k_{zi}$	– коефіцієнт фільтрації у вертикальному напрямку для $i$ -того шару, м/доб;

- $k_{xi}, k_{ri}$  – коефіцієнти фільтрації в горизонтальному напрямку для  $i$ -того шару, м/доб;
- $\eta$  – узагальнена координата;
- $\mu_1$  – коефіцієнт водовіддачі або нестачі насичення верхнього шару відповідно при зниженні або підвищенні РГВ;
- $\omega$  – інфільтраційне живлення водоносного пласта (додаткове живлення), залежне від координати  $\eta$ , м/рік;
- $H$  – глибина завіси, м;
- $K_\phi$  – коефіцієнт фільтрації, м/доб;
- $Q$  – витрата води, м<sup>3</sup>/с;
- $L$  – довжина завіси, м;
- $\omega_0$  – додаткове живлення ґрунтових вод, м/рік;
- $l_2 - l_1$  – відстань, на якій відбувається зміна РГВ під впливом додаткового живлення, м;
- $z$  – відстань від початкової горизонтальної площини до вільної поверхні, м;
- $h_{cp}$  – середній рівень ґрунтових вод, м;
- $f_1$  – додаткове живлення ґрунтових вод, м/добу;
- $s_1$  – кількість опадів, яка інфільтрується в ґрунтові води, м/добу;
- $g_1$  – інтенсивність транспірації, кг/м<sup>2</sup>·добу;
- $d_1$  – інтенсивність випаровування, кг/м<sup>2</sup>·добу;
- $k_1$  – водовідбір з ґрунтових вод, м/добу;



$\Delta h_0$	– зміна рівня ґрунтових вод, м;
$e_1$	– евапотранспірація, м/добу;
$\tau$	– відносна мінливість потенційної транспірації;
$y_{50}$	– параметр, що характеризує висоту капілярного всмоктування води;
$y$	– глибина, де відбувається всмоктуючий тиск вологи, м;
$H_2, H_3,$	– напори на стінках завіси, м;
$H_1, H_4.$	– напори зони дренажу, м;
$L_2$	– довжина завіси, м;
$L_1, L_3$	– зона впливу дренажу, м;
$K_z$	– коефіцієнт фільтрації завіси, м/доб;
$K$	– коефіцієнт фільтрації зони дренажу, м/доб.

## ВСТУП

**Актуальність теми. Актуальність теми.** Підтоплення призводить до руйнування матеріалів підземних комунікацій, забруднення усього підземного простору міст, зокрема верхніх горизонтів підземних вод, виникнення болотистих ділянок і затоплення підземних приміщень у житлових будинках. Такі процеси провокують розвиток цілого ряду екологічно небезпечних біологічних та фізико-хімічних явищ: активного розмноження кровососних комах, появи аскоміцетів, утворення отруйних випарів у повітрі, що шкідливо позначається на здоров'ї населення і спричиняє значні матеріальні збитки. Забезпечення екологічної безпеки територій, що зазнають підтоплення, шляхом попередження розвитку та ліквідації негативних наслідків цього процесу, є важливим завданням підтримання сталого розвитку міст. Для значної кількості міст України характерне систематичне підвищення середнього рівня ґрунтових вод (РГВ) на забудованих територіях та розширення ділянок підтоплення. У 2017 році площа підтоплення становила 89,062 тис. км<sup>2</sup> (8,9 млн га), а кількість підтоплених населених пунктів складала 4747. Цей список починають великі міста України.

На теперішній час залишаються актуальними завдання комплексної оцінки техногенного впливу великих міст на РГВ та прогнозування його зміни, враховуючи натурні дослідження та розроблення математичних моделей для підвищення рівня екологічної безпеки урбанізованих територій, що зазнають підтоплення.

Аналіз наукових досліджень показав, що у великих містах України насамперед відсутня необхідна моніторингова система контролю за режимом ґрунтових вод, спричинена економічними труднощами, тому оцінка та прогнозування розвитку процесу підтоплення останніх років на цих територіях значно ускладнюється. Методи та методики прогнозу підтоплення міських територій потребують розробки моделей, що враховують такі

комплексні техногенні фактори, як: штучні покриття, які зменшують транспірацію через рослини, випаровування з ґрунтових вод та зміну водного балансу підземних вод під впливом додаткового живлення і водовідбору з ґрунтових вод. Таким чином, дослідження процесів та чинників зміни РГВ під час прогнозування максимального їх підняття, що дозволить кількісно оцінити ризик підтоплення, є актуальною науково-прикладною задачею у розрізі екологічної безпеки великих міст.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Результати дисертаційних досліджень відповідають завданням Державної програми «Розвитку українського села на період до 2015 року»; «Програми охорони навколишнього природного середовища м. Харкова на 2008 – 2012 рр.»; Загальнодержавної цільової програми «Питна вода України» на 2011 – 2020 рр.

Основні дослідження роботи проводили в рамках виконання плану науково-дослідних робіт кафедри інженерної екології міст Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова за тематикою «Екологічно сталий розвиток урбосистем в контексті європейської інтеграції України» згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України (державний реєстраційний номер 0117U000679), у якій автор брав участь як виконавець.

Мета роботи полягає у підвищенні рівня екологічної безпеки урбанізованих територій, що зазнають підтоплення ґрунтовими водами.

Для досягнення зазначеної мети поставлено та вирішено такі завдання:

- оцінити величину додаткового живлення в ґрунтові води природно-техногенної геосистеми великого міста;
- дослідити фактичну зміну РГВ у великому місті за багаторічний період;
- розробити математичну модель зміни рівня ґрунтових вод в прямій та зворотній задачі, що враховує вплив штучних покриттів поверхні ґрунту і евапотранспірацію;

- спрогнозувати максимально високі РГВ для забудованих територій за допомогою розробленої моделі;
- для забезпечення екологічної безпеки автодоріг, що зазнають підтоплення ґрунтовими водами, науково обґрунтувати параметри протифільтраційної завіси;
- науково обґрунтувати методологію управління РГВ та попередження підтоплення для підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій.

**Об’єкт дослідження** – зміни рівнів ґрунтових вод природно-техногенних геосистем великих міст (на прикладі м. Харків).

**Предмет дослідження** – комплекс заходів підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій, що зазнають підтоплення, спрямований на управління рівнем ґрунтових вод і боротьбу з підтопленням.

**Методи дослідження.** Дослідження проводились з використанням методів системного аналізу – для створення алгоритму моніторингу, завдань управління та прийняття рішень щодо попередження підтоплення, математичних методів (аналітичне розв’язання диференціальних рівнянь фільтрації із залученням комп’ютерної програми Maple) – для створення моделі зміни РГВ, методів еколого-економічної оцінки та порівняльного аналізу – для визначення вагомих факторів впливу на РГВ та впливу РГВ на довкілля, балансового методу – для оцінки змін РГВ, інструментальних методів (вимірювання РГВ в спеціально обладнаних і пристосованих для цього свердловинах проводились за допомогою рівнеміра ГРУ–100).

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- вперше визначені крайові умови, що враховують вплив штучних покриттів поверхні ґрунту і евапотранспірацію, для розробленої математичної моделі зміни рівня ґрунтових вод, яка дозволяє вдосконалювати прогнози й управління рівнем ґрунтових вод забудованих територій;

– вперше для забезпечення екологічної безпеки автодоріг, що зазнають підтоплення ґрунтовими водами, науково обґрунтовано параметри протифільтраційної завіси, що включають коефіцієнт фільтрації, довжину та глибину завіси;

– удосконалено теоретико-методологічні основи управління РГВ в проекті комплексних заходів з попередження розвитку підтоплення міських територій, шляхом запровадження алгоритму моніторингу РГВ, що враховує потенційні загрози підтоплення територій;

– набули подальшого розвитку методи оцінки максимальних РГВ врахуванням впливу додаткового живлення підземних вод, що дозволяють об'єктивно оцінити зміну рівнів та розвитку підтоплення шляхом моделювання зміни РГВ, які можуть бути основою для розроблення заходів боротьби з цим явищем.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі одержаних фактичних даних про РГВ в м. Харків з 2004 по 2017 рр. створено базу для прогнозу розвитку підтоплення в місті, розроблено рекомендації щодо впровадження практичних заходів з оптимізації статей водного балансу ґрунтових вод та напрямків використання дренажних вод, розроблено алгоритм дій у ході проведення моніторингу за РГВ на підтоплених і потенційно підтоплених територіях та Проект комплексу заходів з попередження розвитку підтоплення міської території великих міст з урахуванням європейського досвіду, що підвищить рівень екологічної безпеки урбанізованих територій, які зазнають підтоплення ґрунтовими водами.

Результати дисертаційної роботи використані у навчальному процесі на кафедрі «Механіка суцільних середовищ та опір матеріалів» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» для студентів зі спеціальності «Комп'ютерні науки» (Довідка про впровадження від 26.09.2018 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати, які викладені в дисертації, отримані особисто автором, а саме: досліджено зміну РГВ за період з 2004 по 2017 рр. в м. Харків і виконано аналіз цих даних; розроблено математичну модель зміни РГВ на обмежених міських територіях, яка враховує вплив штучних покриттів поверхні ґрунту і евапотранспірацію. Виконано прогноз зміни РГВ урбанізованої території на прикладі м. Харкова на перспективу 50 років.

Розроблено теоретико-методологічні підходи до управління рівнем ґрунтових вод, що включають типову схему взаємодії органів управління та завдань попередження і ліквідації наслідків підтоплення, алгоритм дій у ході проведення моніторингу за РГВ на підтоплених і потенційно підтоплених територіях та Проект комплексу заходів з попередження розвитку підтоплення міської території великих міст з урахуванням європейського досвіду.

Вибір теми дисертаційної роботи, постановка завдань дослідження, обговорення одержаних результатів були проведені разом із науковим керівником – доктором геологічних наук, доцентом В. В. Яковлевим. Внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві, наведений у списку праць за темою дисертації (Додаток А).

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні результати роботи доповідалися на міжнародних конференціях і наукових семінарах: II International Water Forum Aqua Ukraine (м. Київ, 2004); VI International Youth Environmental Forum “Ecobaltica’2006” (St. Petersburg, Russia, 2006); 12<sup>th</sup> International Student Conference “Economics for Ecology” (Sumy, Ukraine, 2006); 6<sup>th</sup> International Conference on Technologies for Waste and Wastewater Treatment. Eco–Tech 2007 (Kalmar, Sweden, 2007); International Youth Science Environmental Forum “Ecobaltica’2008” (St. Petersburg, Russia, 2008); 2-ій Всеукраїнській студентській науково-технічній конференції «Сталий розвиток міст» (м. Харків, 2009); International Conference on Natural Sciences and Technologies. Linnaeus Eco–Tech’10 (Kalmar, Sweden 2010); XIX

Міжнародній науковій конференції «Економіка для екології» (м. Суми, 2013); VII Міжнародній науково-технічній конференції молодих фахівців, аспірантів і студентів «Математичне та комп'ютерне моделювання природно-наукових і соціальних проблем» (Росія, м. Пенза, 2013); X Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні наукові конвенції – 2014» (Praha, 2014); XXI Міжнародній науковій конференції «Економіка для екології» (м. Суми, 2015); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки» (м. Кременчук, 2015).

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 23 наукові праці, зокрема 11 статей, з яких 7 статей – у наукових фахових виданнях із переліку МОН України, а з них 3 статті індексуються міжнародними наукометричними базами даних, 12 тез доповідей у матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел, 7 додатків. Загальний обсяг роботи становить 166 сторінок. Дисертаційна робота містить 63 рисунки та 6 таблиць за текстом. Список використаних джерел кількістю 111 найменувань – на 13 сторінках. Сім додатків розміщені на 15 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ, ЩО ЗАЗНАЮТЬ ПІДТОПЛЕННЯ

#### 1.1 Тенденції розвитку підтоплення у регіонах світу та України

На сучасному етапі розвитку та прояву екологічних факторів підтоплення його можна визначити як комплексний, переважно техногенний, процес стійкого підвищення рівня ґрунтових вод і зволоженості порід зони аерації, які ускладнюють або унеможливають нормальну експлуатацію господарських об'єктів, а також погіршують екологічні умови життєдіяльності [10, 30].

Згідно Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів до підтоплених міських територій відносять такі, на яких рівень ґрунтових вод розташований ближче 2,5 м до поверхні землі [31, 32]. Нормативне значення (2–2,5 м) забезпечує глибину залягання ґрунтових вод нижче підлоги підвалів житлових будівель другої половини минулого століття. У більшості сучасних будівель підземна частина набагато глибше, тому проблема підтоплення та екологічна небезпека особливо актуальні в сучасних міських умовах.

З кожним роком площа підтоплення міських територій зростає. Підтоплення охопило багато міст світу. Причини підтоплення різні. Підтоплені міста України, європейської частини Росії, Уралу, Сибіру, Казахстану, Середньої Азії. Міста Великобританії, країн Західної, Центральної та Східної Європи, США, Бразилії, Індії, Китаю, Саудівської Аравії також не уникли цього несприятливого процесу.

Розвиток промисловості у багатьох великих містах Європи протягом 19 і початку 20 століть багато в чому зобов'язані наявності якісної та доступної підземної води. В Великій Британії, водоносні горизонти були значною



мірою використані для цієї мети. З початку 1800-х років до 1940-х рр. були пробурені тисячі свердловин і підземні води широко використовувались.

З розвитком і розширенням міст, були створені високі будівлі з глибшими підвалами, тунелі метрополітену та інші підземні комунікації. При цьому рівні ґрунтових вод протягом десятиліть були на десятки метрів нижче фундаментів. Часто робились припущення, що ці рівні ґрунтових вод були статичними і не вважались фактором, який слід враховувати в геотехнічному проекті конкретного об'єкту. В середині 1960-х років в Лондоні розвиток важкої промисловості різко знизився. Наступне зниження водовідбору для потреб промисловості, призвело до підвищення рівня ґрунтових вод. Починаючи з 1970-х років, спостерігається підвищення рівня ґрунтових вод в декількох великих містах, зокрема, у Бірмінгемі, де повідомлялося про затоплені підвалини, в Ліверпулі, де мали повені в тунелі British Rail [33]. Відомо, що в період 1980–1990 рр. рівень ґрунтових вод у Центральному Лондоні ріс на швидкості близько 1 м/рік, переважно за рахунок скорочення промислового водовідбору. Через загрозу підтоплення в 1992 році було розроблено стратегію управління рівнем води, яка мала мету управляти рівнем ґрунтових вод у крейдяному водоносному горизонті під центральним Лондоном для того, щоб зберегти цілісність підземних споруд і фундаментів.

Реалізація стратегії була досягнута ліцензуванням водовідбору та моніторингом підземних вод. Численні великі водокористувачі отримали ліцензії на водокористування для того, щоб уповільнити зростання рівня ґрунтових вод і в кінцевому підсумку стабілізувати його. Також було зроблено додатковий водовідбір та постійний моніторинг РГВ для надання допомоги в управлінні рівнем ґрунтових вод. Після 2000-го року рівень ґрунтових вод стабілізувався [34]. Однак дані моніторингу 2018 р. свідчать про те, що в деяких районах Лондона рівень ґрунтових вод знову падає. У центрі басейну, де водовідбір триває дуже довго, спостерігаються депресії

рівнів ґрунтових вод. Тому було вирішено обмежити водовідбір та розробити нові стратегії ліцензування водовідбору [35].

Явища не обмежуються Великобританією. Кілька подібних випадків було зафіксовано у Франції та Західній Німеччині [36], у Нью-Йорку були деякі труднощі з експлуатацією його підземної мережі через підвищення рівня ґрунтових вод. У Франції, при збільшенні водовідбору з підземних вод, рівень ґрунтових вод знизився на 45 м і був найнижчим у 1970 р. Під час будівництва підземних паркінгів 1960–х роках, складських приміщень та розширення метрополітену, що були побудовані в обезводнених пластах, ці рівні спричинили декілька випадків сильної підземної повені [36].

Саудівська Аравія характеризується засушливим середовищем, і відома як найбільша країна світу без не пересихаючих річок або озер. Опадів в цій країні приблизно 100 мм/рік. Значна частина води в країні використовується з підземних джерел. На заході країни, розташоване місто Мадіна, де ґрунтові води являють собою головне джерело водопостачання. Ґрунтові води чутливі до змін, особливо в областях швидкого розвитку міст. В останні роки місто зазнало швидкого зростання населення, і досягає більше ніж один мільйон та такою ж кількістю відвідувачів щороку. Центральна частина міста зазнала значного помірного зростання підземних вод на більш ніж десять років. Дослідження показали, що відбулося часткове блокування потоку підземних вод за рахунок великої інфраструктури міста [37].

Проблема підтоплення ґрунтовими водами міських та промислових територій та виникнення екологічно небезпечних явищ, викликаних підтопленням, у країнах колишнього СРСР виявилася актуальною починаючи з 70–х років ХХ ст., а у теперішній час практично в кожній з цих країн стала екологічною проблемою національного масштабу.

Відомо, що процес підтоплення викликає та активізує низку небезпечних геологічних процесів, тому активізація підтоплення, що відбувається в межах окремих областей України, в останні роки, є реальною загрозою безпеки життєдіяльності населення та функціонування численних

господарських об'єктів. У зв'язку з цим, питання вивчення умов розвитку та поширення площ підтоплення в межах всієї території держави, а також організація спостережень за ним, стає в ряд першочергових і невідкладних. Під зростаючим впливом техногенних чинників спостерігається тенденція до розширення площ підтоплення та негативного впливу на довкілля [12, 13, 15, 38].

Порушення режиму підземних вод та розвиток і розширення підтоплених територій є наслідком втрат води з водопровідних комунікацій, безгосподарського ставлення до територій, що освоюються, недотримання вимог законодавства при проектуванні та будівництві нових об'єктів, невиконання державних планів та програм з причин недостатнього фінансування, своєчасних вишукувань, ретроспективних аналізів інженерно-геологічних умов територій, що забудовуються, відсутності якісних довгострокових прогнозів.

Районування території України за умовами і ступеню підтоплення представлено на рис. 1.1.

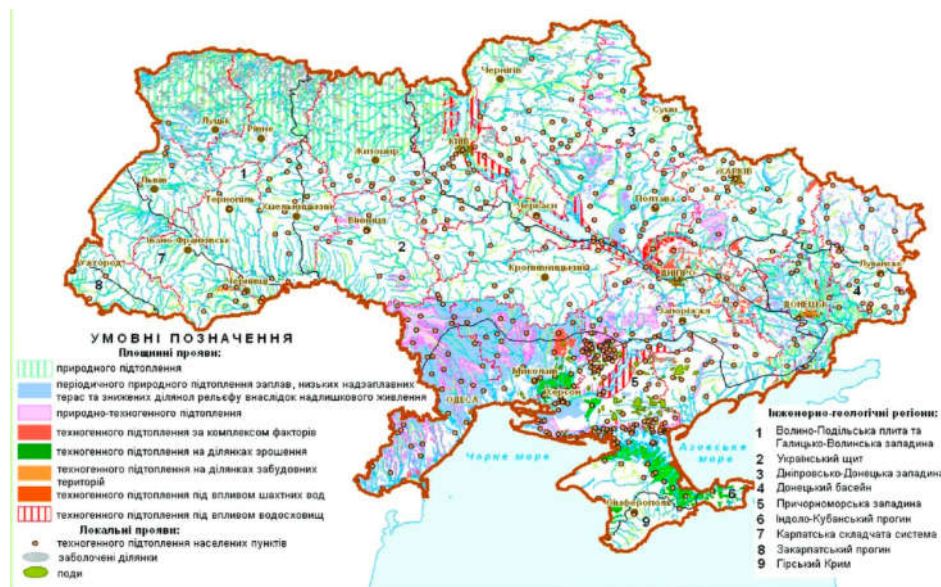


Рисунок 1.1 – Поширення підтоплення на території України за даними [41–

На Україні кількість міст і селищ із сталими проявами підтоплення за період з 1984 по 2000 рік зросла з 265 до 541 (в два рази), а загальна площа підтоплених територій в цих містах і селищах збільшилася з 88667 до 196205 гектарів [39]. В 2004 році підтоплення як природне і як техногенне явище, охоплює загалом близько 70 тис. кв. кілометрів (7 млн га), або 12 відсотків території держави [40]. На 2011–2014 рр. площа підтоплення в межах території України вже становила 79,44 тис. км<sup>2</sup> (7,9 млн га), а кількість підтоплених населених пунктів зросла до 4702 [41–43].

У межах Одеської області площа підтоплення становить 20,575 тис. км<sup>2</sup>. Підтопленими є 983 населені пункти, серед яких 15 міст, 26 селищ міського типу і 942 села. Значні площі межиріч у південній та південно-західній частинах області є природно підтопленими, на решті території підтоплення має техногенний характер і розвивається під впливом господарської діяльності. Майже 30% площі зони м.Одеси нині в зоні постійного підтоплення, частково підтопленою є центральна частина міста, окремі промислові об'єкти, зокрема Іллічівський паливний термінал, Іллічівський порт, тощо.

У Миколаївській області підтопленими є понад 17,0 тис км<sup>2</sup> території, зокрема 761 населений пункт (із заляганням рівнів ґрунтових вод до 4 м), з них – 9 міст, 15 селищ міського типу та 737 сіл. У м. Миколаєві підтопленими є 7 ділянок площею понад 50 км<sup>2</sup>.

У Херсонській області підтоплення фіксується на площі 11,3 тис. км<sup>2</sup>. Підтопленими є 306 населених пунктів, серед яких 2 міста, 19 селищ міського типу та 285 сіл. Підтоплення у м. Херсон проявляється у вигляді локальних ділянок, які з часом можуть трансформуватися у великі площі, і фіксується на 50% території міста.

Техногенне підтоплення займає в м. Дніпропетровськ – 20%, м.Дніпродзержинськ – 24%, м. Кривий Ріг – 15% площі міст.

У Донецькій області підтоплення фіксується на площі 1,66 тис. км<sup>2</sup>. Підтопленими є ділянки загальною площею 230,0 км<sup>2</sup>, що охоплюють території 31 міста та 347 сіл, площа підтоплення сіл становить 68,46 км<sup>2</sup>.

У західних областях України найбільші площі підтоплення збігаються з площею гірничих робіт у Львівсько-Волинському басейні. У межах Червоноградського ГПР підтоплення території фіксується на площі майже 62 км<sup>2</sup> (м. Червоноград, Сокаль та с. Гірник, Межиріччя, Соснівка). Загальна площа підтоплення в межах Львівської області становить 0,25 тис. км<sup>2</sup> [44–46].

Підтоплення в Харківській області розповсюджено в 39 містах та селищах міського типу, та в 205 селах [10]. Інтенсивний розвиток м. Харкова за останні десятиліття спровокував розширення площ підтоплення. Площа підтоплених земель в м. Харкові на початку 80–х років згідно [10] складала 4,7 тис га (47 км<sup>2</sup>), а потенційно підтоплених земель – 8,8 тис га (88 км<sup>2</sup>). У наступний період з 2010 р. по 2014 р. згідно даних інформаційного щорічника [41, 47] площа підтоплення ще збільшилася до 19 тис. га (0,19 тис км<sup>2</sup>).

## **1.2 Аналіз даних науково-технічної літератури щодо екологічної безпеки територій, які підтоплюються**

Основи загальної концепції техногенного впливу на підземну гідросферу забудовуються територій і способи боротьби з підтопленням були викладені в середині минулого століття в роботах Абрамова С. К. [15, 38] і Дзекцера Є. С. [15–17].

Інженерні методи боротьби з підтопленням і застосування нових інженерних рішень по влаштуванню дренажу на міських територіях досліджені в роботах Бугая Н. Г., Кривонога А. І., Пивовара Н. Г. та інш. [48].

Підтоплення і його наслідки розглянуто в роботах Барщевського М. Є., Швеця В. Я. та інш. [4, 30].

Описано фактори, що впливають на розвиток підтоплення міських територій в роботах Абрамова С. К., Бабенко В. Д., Голуба В. П., ДегтярьоваБ. М., Стрижельчика Г. Г., Телими С. В., Шестопалова В. М., Яковлева Є. А, Яцика А. В. та інш. [1–3, 6–10, 15, 49, 50].

Розробкою нормативно-законодавчої бази щодо захисту від підтоплення та екологічно небезпечних явищ, зумовлених підтопленням займалися Разметаєв С. В., Чебанов А. Ю. та інш. [51].

Прогнозуванням, моніторингом та розрахунковими методиками з гідравлічними рішеннями займались Абрамов С. К., Аверьянов С. Ф., Біляєв Н. Н., Бочевєр Ф. М., Буц Ю.В., Верігін Н. Н., Крємєз В. С., Луццик А. В., Муфтахов А. Ж., Павловський М. М., Полубарінова-Кочіна П. Я., Покутнєва Л. В., Пшинько А. Н., Сологаєв В. І., Телима С. В., Цимбал В. А. та інші [6–9, 18, 19, 52–57]. З'ясовано, що математичні моделі попередників не враховують штучні покриття на поверхні ґрунту та дію евапотранспірації.

В роботі [58] проведена інвентаризація підтоплень, що виникли внаслідок будівництва доріг. Проблема підтоплення розглядається тільки збоку антропогенного впливу доріг на розвиток підтоплення. Але вплив підтоплення на стійкість доріг, та вплив полів зрошення поблизу автошляхів на зміну рівнів ґрунтових вод в роботі не розглянуто. Тобто проблема розглядається не комплексно та ряд важливих техногенних факторів не враховано.

Автор роботи [59] наводить варіанти застосування протифільтраційних завіс у містах як для захисту від підтоплення окремих майданчиків, будівель і споруд, так і для будівництва несучих і огорожувальних конструкцій і фундаментів. Автор робить акцент тільки на одному типі протифільтраційних завіс – залізобетонних, для захисту станцій метрополітену від дії підземних вод. Проте протифільтраційні завіси з іншими параметрами не розглядаються.

Результати комплексних досліджень мікроструктури та інтенсивності фільтрації протифільтраційних завіс висвітлені в роботі [60]. Проте є

невирішеним питання довжини та глибини занурення протифільтраційних завіс.

Автори роботи [61] дослідили ефективність встановлення протифільтраційних завіс для захисту фундаменту греблі. Дослідження проведені для обмеженої кількості варіантів вибору матеріалів для протифільтраційних завіс, що обмежує можливості використання протифільтраційних завіс.

Концепція «композитної стіни» у якості протифільтраційної завіси з використанням глини та бетону, як основних складових завіси, представлена в роботі [61]. Але автори надають детальне обґрунтування параметрів тільки двох типів протифільтраційних завіс: глиняної та бетонної, та пропонують використовувати завіси в обмежених умовах.

Існуючі методики фільтраційних розрахунків при малій потужності потоків ґрунтових вод і на початку необводнених ґрунтів [63] охоплюють не всі важливі випадки підтоплення і дренажування. Наприклад, раніше не було відомо точного рішення рівнянь фільтрації при радіальному розтіканні по водоупорах в необводнених ґрунтах, а також інші випадки.

Останні публікації про верховодки і потоки ґрунтових вод малої потужності [64] містять рішення в рамках лінеаризованої гідравлічної теорії фільтрації і носять частковий характер з ідеалізованими постановками про нескінченно віддалені межі впливу, тобто з досить наближеними рішеннями.

Огляд публікацій [61] показав, що в існуючій методології прогнозів підтоплення і дренажування у різних авторів фактично відсутнє врахування впливу конструкцій і технологій будівництва.

У той же час з'явилися нові та оригінальні розробки укріплювальних конструкцій, в тому числі збірні ґратчасті, гнучкі асфальтобетонні і залізобетонні, із застосуванням геотекстилю та геоконтейнерів і ряд інших. Початок узагальнення різних типів укріплень покладено в роботах [61]. Однак науково обґрунтоване рішення даної проблеми з розробки та вдосконалення нових конструкцій пов'язане з необхідністю формування

теоретичних і концептуальних основ проектування укріплювальних споруд. Започаткування таких основ належить автору роботи [64].

Таким чином, результати літературного аналізу дозволяють зробити висновок про те, що використання протифільтраційних завіс може мати більш широкий спектр використання в боротьбі з екологічно небезпечним підтопленням, завдяки моделюванню параметрів їх функціонування за різних умов застосування та експлуатації [65–68].

### **1.3 Чинники та фактори підтоплення міських територій**

Чинники підтоплення поділяються на дві групи:

- природні;
- техногенні;

Природні чинники підтоплення:

– кліматичні умови (атмосферні опади: зливові і талі води). Цикли коливань клімату на земній кулі досить чітко встановлені як 11-річні. Режим ґрунтових вод залежить від клімату, так як ґрунтові води співвідносяться з атмосферою через зону аерації. Однак, регіональний клімат великих територій не має чітко вираженого впливу на підтоплення міст і населених пунктів, процеси підтоплення мають азональний характер [19];

– характер рельєфу, що визначає умови стоку зливових та талих вод, а також впливає на їх інфільтрацію в ґрунт. При достатньому уклоні і відсутності місцевих понижень утворюються сприятливі умови для поверхневого стоку. При слабких уклонах та наявності западин і низин вагома частина цих вод затримується та інфільтрується в ґрунт;

– гідрографічна мережа суттєво впливає на умови природного дренажу підземних вод, а значить, і на підтоплення. Нещільна та слаборозвинута й неглибоко врізана гідрографічна мережа ускладнює дренажу і тим самим утворює сприятливі передумови для неглибокого



залягання підземних вод. Глибокі западини та річкові долини сприяють доброму дренаванню підземних вод [15];

– опускання поверхні прибережних міст, землетруси. Опускання поверхні прибережних міст може відбуватися через тектонічних рухів і переміщень земної кори повільно в часі або швидко, при землетрусах. Повільно занурюється в море Італія, особливо Венеція. Занурюється Голландія, 40% її території знаходиться на відмітках нижче рівня моря. Щодобові землетруси на озері Байкал призводять до опускання його прибережної території і підтоплення берегів. Прибережна територія міста Одеса з'їжджає у бік моря зі швидкістю 5–6 мм/рік. Крім опускання земної поверхні, землетруси, трясучи ґрунт, викликають підвищення РГВ до величин порядку 1–2 м [19].

Специфічною особливістю міських територій є порушений режим підземних вод та їх природний баланс, в якому визначальну роль відіграють техногенні фактори.

Техногенні чинники підтоплення:

– надмірна зарегульованість річкового стоку і недостатня кількість дренажних споруд зумовлюють у багатьох випадках регіональне підвищення рівнів ґрунтових вод до критичних величин та виникнення екологічно небезпечних явищ. У результаті будівництва у другій половині 20 ст. водоймищ та ставків на річках України (більше 1000 водосховищ та 28000 ставків) розвивається заболочування та перезволоження ґрунтів, на значних площах проявляється прогресування підтоплення;

– замулення русел річок внаслідок розорювання прибережних смуг і крутосхилів, відсутність у населених пунктах постійнодіючої водоскидної мережі для відводу зливових та талих вод, а також відсутність належного вертикального планування забудованих територій;

– на підтоплення у населених пунктах значною мірою впливає незадовільний технічний стан споруд і мереж водопостачання та відведення, четверта частина яких відпрацювала нормативний термін амортизації. Понад

37 тис. км (30%) водопровідно-каналізаційних мереж перебуває в аварійному стані [69], що зумовлює виникнення загроз екологічної безпеки забудованих територій міст. Втрати питної води з водопровідних мереж складають 30–35% від її подачі, а з каналізаційних мереж 10–50%. Техногенні втрати води з мереж по Україні складають 3,6 млрд м<sup>3</sup>/рік, а сучасний сумарний об'єм господарчо-питного водоспоживання в Україні складає 4,5 млрд м<sup>3</sup>/рік [12–13]. Витік стічних вод пошкоджених каналізаційних мереж призводить не тільки до підтоплення земель, а й до ускладнення санітарно-епідемічного стану міських територій;

- відставання облаштування зливової каналізації від облаштування водопровідних систем, у зв'язку з чим не відбувається відведення стічних вод;

- пошкодження, засмічення та виведення з ладу дренажних систем, які побудовані з метою попередження процесів підтоплення населених пунктів і сільськогосподарських угідь, ліній електропередач до них, несанкціоноване перекриття перемичками дренажних колекторів;

- баражування природного стоку поверхневих і ґрунтових вод різноманітними інженерними комунікаціями (залізниці, автошляхи, газо- та нафтопроводи, фундаменти будівель тощо) без належних водопропускних споруд, а також замулення та засмічення існуючих;

- несанкціоноване будівництво у зонах впливу водних об'єктів (річок, водосховищ, каналів) тощо [69, 70];

- наявність великих площ, що мають тверде покриття, що зменшує транспірацію та випаровування;

- техногенні просадки поверхні землі;

- затоплення шахт та інш.

Одним з найважливіших показників формування водообмінних процесів на міських територіях є інтенсивність додаткового інфільтраційного живлення. Для оцінки значущості впливу додаткового живлення на зміну рівня ґрунтових вод та їх якісний склад, були досліджені фактори, що впливають на рівень ґрунтових вод.

Широкомасштабні й інтенсивні темпи антропогенних впливів приводять до значних перетворень геологічного середовища. Особливо помітної перебудови зазнає підземна гідросфера, оскільки інженерне освоєння будь-яких територій тією чи іншою мірою викликає порушення природних умов живлення, циркуляції й розвантаження підземних вод, тобто порушення умов природнього водообміну. На площах міської забудови масштаби впливу антропогенної діяльності на водообмін такі, що практично сьогодні немає територій, де б не був порушений природний режим підземних вод. Ступінь такого порушення залежить від багатьох факторів, але насамперед від структури геофільтраційного середовища, типу водообмінного басейну, глибини освоєння підземного простору, характеру забудови й заходу антропогенного навантаження [26].

Міські території характеризуються насамперед неоднорідністю забудови, різноманітними умовами землекористування, наявністю багатоконпонентних функціональних зон – сільбищна, промислова, зелена, складська і т. д., а також наявністю чисельних транспортних артерій, інженерних комунікацій, агропромислових комплексів. У межах кожної окремо взятої функціональної зони можуть бути свої різноманітності, пов'язані з типом забудови (багатоповерхова, одноповерхова, стара, нова), схемами інженерних мереж, організацією рельєфу, благоустроєм, озелененням і щільністю забудови. Враховуючи різноманітність геофільтраційної будови територій міських агломерацій, мабуть, слід очікувати й значну водообмінну неоднорідність.

У межах міських територій основні фактори антропогенних впливів на стан підземної гідросфери – це інфільтраційні втрати вод господарського й промислового призначення, посилення підземного стоку шляхом штучного дренажу й забору води на господарсько-питні потреби, інженерне освоєння території й підземного простору. Підземний простір на забудованих територіях є частиною природно-технічної системи. Глибина освоєння досягає десятків, а на підроблюваних територіях – сотень метрів. Верхній

поверх охоплює інтервал 0 – 10 м. на цьому рівні розташовуються підземні частини більшості будинків і споруджень промислових і цивільних об'єктів, інженерні мережі комунікацій, каптажні обладнання дренажних систем. Цю частину відрізняє поширення максимальних амплітуд сезонних і багаторічних коливань вологісних, температурних, гідродинамічних і багатьох інших показників. У цій зоні розвивається цілий ряд негативних геологічних процесів: підтоплення, заболочування, усадки, осідання, суфозія, набрякання, утворення агресивних середовищ.

Глибина освоєння підземного простору другого поверху, розташованого нижче, становить 10 – 30 м. Тут здійснюється, в основному, будівництво й експлуатація підземних транспортних тунелів, колекторів глибокого закладення, фільтрів, шпар, вертикального дренажу. Зона характеризується відносною стійкістю температурних і вологісних полів, а також значною мінливістю гідрохімічних і гідродинамічних показників. З негативних геологічних процесів у ній можуть розвиватися карст, бараж, зсуви, суфозія, забруднення підземних вод та інш.

Третій поверх виділяється на глибині 30 – 150 м і більше. Тут, крім підроблюваних територій, проводиться, головним чином, експлуатаційний водозабір і прокладка тунелів глибокого закладення. Геотемпературний і водний режим має відносно сталий характер. У цій зоні порушення водного балансу відбувається переважно під впливом водозабору, що формує нерідко великі депресійні воронки. Зниження рівня підземних вод обумовлює зменшення гідростатичного зважування й відповідно осідання земної поверхні [10].

Одним з важливих показників формування водообмінних процесів на міських територіях є інтенсивність інфільтраційного живлення. Центральні частини міст, що мають найвищу щільність забудови й покриттів площ і вулиць асфальтом або бетоном (за рахунок чого різко скорочується роль процесів випару у водообміні), особливо при відсутності організованого відводу поверхневого стоку, характеризуються найбільш сприятливими

умовами для формування додаткового живлення. Звичайно ця величина тут максимальна. На територіях сучасних мікрорайонів і житлових зон забудова будинками й відсоток асфальтування відносно знижуються й тому додаткове інфільтраційне живлення зменшується до  $(0,5 - 3) \cdot 10^{-4}$  м/доб, або 5500 – 33000 тис м<sup>3</sup>/рік (Для великих міст додаткове живлення складає  $1,9 \cdot 10^{-3}$  м/доб або 210000 тис м<sup>3</sup>/рік) [26].

#### **1.4 Аналіз методів моделювання при вирішенні гідрогеологічних завдань екологічного напрямку**

Розглянемо метод гідрогеологічного моделювання, заснований на вирішенні диференціальних рівнянь фільтрації на територіях що забудовуються і забудованих територіях, з використанням обчислювальних систем та програм. Цей метод дозволяє вирішити найскладніші гідрогеологічні задачі на великих об'єктах досліджень, наприклад при багат шарових пластах і складному контурі меж пласта. Переваги математичних моделей полягають в тому, що вони точні й абстрактні, передають інформацію логічно однозначним чином. Моделі точні, дозволяють здійснювати передбачення, які можна порівняти з реальними даними, поставивши експеримент або провівши необхідні спостереження.

З недоліків цього методу в першу чергу слід відзначити його неуніверсальність, коли отримане рішення може підходити тільки для конкретного об'єкту, а для вирішення нового завдання потрібна побудова іншої моделі. А також при моделюванні пред'являються підвищені вимоги до вихідної інформації про фільтраційні і ємнісні властивості водоносних шарів, умови їх живлення, дренажування і т. д. Проте в переважній більшості випадків вихідна гідрогеологічна інформація, отримана в процесі інженерних вишукувань завжди недостатня. Необхідно відзначити також, що швидкому отриманню результатів рішення задачі при моделюванні передують досить тривалий етап створення моделі, налагодження програми на ЕОМ і т.п. [71,

72]. В гідрогеології, моделювання (у вигляді так званого фізичного моделювання) бере початок з дослідів Дарсі Ж. (1856 р.), Форхгеймера Ф. (1898 р.), Хелле-Шоу Г. (1897 р.). У колишньому СРСР воно отримало розвиток завдяки роботам Аравіна В., Гавіч І., Жернова І., Замаріна Є., Шестакова В. та ін. [72–74]. Зараз при гідрогеологічному моделюванні головним чином застосовуються числові методи розв’язання крайових задач фільтрації і міграції підземних вод за допомогою комп’ютерів. Головні гідрогеологічні задачі, які зараз вирішуються за допомогою моделювання, такі:

- оцінка ресурсів і експлуатаційних запасів підземних вод;
- прогноз гідрогеологічних умов на зрошувальних територіях;
- оцінка припливів до кар’єрів і шахт;
- вивчення гідрогеологічних процесів в зоні аерації;
- вивчення процесів забруднення підземних вод;
- оптимізація умов експлуатації водозаборів та дренажних споруд;
- визначення параметрів фільтрації та міграції підземних вод;
- побудова постійно діючих гідрогеологічних моделей великих регіонів з метою управління водними ресурсами [72–74].

## **1.5 Аналіз наслідків підтоплення міських територій**

### **1.5.1 Екологічні наслідки підтоплення міських територій**

Підтоплення призводить до комплексної зміни природних умов. При підтопленні змінюються не тільки рівні, але й гідрохімічний режим ґрунтових вод, вологісний і сольовий режими ґрунтів зони аерації, просадні властивості ґрунтів, ґрунтоутворюючі процеси, властивості ґрунтів і пов’язана із цим трав’яниста й деревна рослинність, тваринний світ, мікроклімат [73]. Підтоплення прибережних земель водосховищ, заболочення і заростання їх берегів викликають трансформацію земель,

деградацію рослинного і тваринного світу, відмирання і загнивання рослинних решток, заболочування і евтрофікацію акваторій і узбережжь, загрожують населеним пунктам і народногосподарським об'єктам, обмежують можливості рекреаційного використання водосховищ [74]. При підтопленні і затопленні територій різко збільшується інтенсивність розчинення техногенних забруднювачів у ґрунтах і в підстилаючих породах, що збільшує ризик забруднення поверхневих і підземних водозаборів і гідросфери вцілому [75, 76]. Зі зменшенням потужності зони аерації знижується її захисна роль і ґрунтові води піддаються додатковому забрудненню. Процес підтоплення викликає та активізує низку інженерно-геологічних процесів, таких як карст, суфозія, зсуви. Підтоплення в сейсмічних районах підвищує силу землетрусу [26, 30].

### **1.5.2 Соціально-економічні наслідки підтоплення**

У результаті підтоплення руйнуються матеріали підземних комунікацій, забруднюється увесь підземний простір міст, зокрема верхні горизонти підземних вод, з'являються болотисті ділянки і затоплені підземні приміщення в житлових будинках. Це призводить до розвитку цілої низки екологічно небезпечних біологічних та фізико-хімічних явищ: появи кровососних комах, розвитку цвілевих грибків, утворення отруйних випарів у повітрі, що шкідливо позначається на здоров'ї населення і спричиняє значні матеріальні збитки. [41, 45, 49, 62]. Взаємодія ґрунтових вод з підставами будинків і інженерних комплексів міст істотно впливає на їхню стійкість і надійність. Внаслідок насичення ґрунтів водою відбуваються просадки поверхні землі, зменшується несуча здатність ґрунтів, в наслідок чого деформуються підстави фундаментів, руйнуються будівлі. Зміни рівня ґрунтових вод призводять до змін інженерно-геологічних властивостей основ, а також викликає зміни в наземних біоценозах і в умовах життєдіяльності людини. Простежується тісний зв'язок гідрогеологічної

проблеми із соціально-економічними, природоохоронними й управлінськими проблемами. Підтоплення також завдає значної шкоди архітектурно-історичним пам'яткам України, з їх загальної кількості 17977 підтоплено і потребує інженерного захисту 12000. Серед них церкви Спасана-Берестові, Андріївська, Кирилівська в м. Києві, ландшафтний парк "Качанівка" в Чернігівській області, Лівадійський і Алупкинський палаци, будинок-музей Чехова А.П. в м. Ялті, склеп Дементи в м. Керчі та інші [39].

## **1.6 Боротьба з підтопленням в Україні і в світі**

Заходи боротьби з підтопленням принципово можливо розділити на: 1) попереджувальні заходи і 2) ліквідація вже існуючого підтоплення. Вибір оптимальних заходів є головним завданням в боротьбі з підтопленням. Попереджувальні заходи виконуються з метою попередження розвитку підтоплення на освоєваних територіях і спрямовані проти факторів, дія яких може мати місце при будівництві та експлуатації розглянутих об'єктів. Розглянемо європейський та український досвід боротьби з підтопленням [27].

### **1.6.1 Аналіз Європейського досвіду боротьби з підтопленням**

На підставі аналізу науково-технічних документів щодо боротьби з підтопленням, можна зробити наступні висновки:

– Згідно Директиві по підземним водам, та досвіду Європейських країн, основна увага приділяється контролю та управлінню джерелами поповнення ґрунтових вод. Основною метою програм з попередження підтоплення є забезпечення балансу між водовідбором та поповненням ґрунтових вод [77].

– Підтоплення в Дрездені, та всій Саксонії (Німеччина), за останні роки викликало значні збитки в міських районах. За наслідками повеней серпня 2002 року, 16% збитків в будівлях Саксонії були викликані ґрунтовими



водами. Наслідки швидко зростаючого рівня ґрунтових вод могли призвести до нестабільності будинків, фільтрації ґрунтових вод в каналізацію, повторного забруднення ґрунту, забруднення ґрунтових вод та інше. Тому було запропоновано інтегроване управління ризиком, що має включати в себе вплив повені на ґрунтові води. Було обґрунтовано ефективність моделювання поширення підземних вод міських територій для комплексної оцінки ризиків підтоплень [28].

– Оксфорд розташований у вузькій долині складеної алювіальними відкладами з річки Темзи. Місто страждає від періодичних повеней. Рівень ґрунтових вод є першопричиною затоплення річковими водами території міста Оксфорд. Геологічна служба Великобританії разом із Агентством з навколишнього середовища сприяла розробці та встановленню мережі моніторингу ґрунтових вод на території м. Оксфорд. На базі отриманих даних було розроблено детальну 3D геологічну модель міста, яка в свою чергу лягла в основу моделі потоку ґрунтових вод. Дослідницька робота Геологічної служби велася у тісному зв'язку моделі ґрунтових вод заплавних відкладів із моделлю річки Темзи. Це доцільно використовувати для імітації умов повені та оцінки можливих схем зменшення повеней [77–79].

– У Великобританії створено сайт, на якому щомісяця науковці висвітлюють прогноз на 3 місяці щодо зміни рівня ґрунтових вод та річкового стоку на всій території Великобританії. База оновлюється щомісяця, території, що досліджуються поширюються. На сьогоднішній день контролюється 25 місць по всій Великобританії. Програма називається «Гідрологічний прогноз» (Hydrological Outlook) та підтримується завдяки співробітництву з «Дослідницьким центром навколишнього середовища з екології та гідрології», з «Геологічною службою Великобританії», з британським і шотландським «Агенством з навколишнього середовища», з «Метеобюро», з «Природні ресурси Уельсу» та з «Річкове агенство Північної Ірландії». Для прогнозу зміни РГВ використовуються математичні моделі. Для річкового стоку використовуються 3 підходи: аналогії річкового стоку,

залежність річкового стоку від історичного клімату, та залежність річкового стоку від прогнозу опадів. Англійці підходять до проблеми зміни рівня ґрунтових вод комплексно, багато організацій з різних галузей співпрацюють на єдину мету. Кожна організація має базу даних багаторічних спостережень та використовує власні методи для більш точного прогнозу. До того ж програма «Гідрологічний прогноз» є доступною та відкритою для кожного, а дані прогнозів можуть використовуватись на етапі проектування будівництва та є завжди актуальними [79].

– В середині 1960–х років в Лондоні розвиток важкої промисловості різко знизився. Наступне зниження водовідбору для потреб промисловості, призвело до підвищення рівня ґрунтових вод. Через загрозу підтоплення в 1992 році було розроблено стратегію управління рівнем води, яка мала мету управляти рівнем ґрунтових вод у крейдяному водоносному горизонті під центральним Лондоном для того, щоб зберегти цілісність підземних споруд і фундаментів.

Реалізація стратегії була досягнута ліцензуванням водовідбору та моніторингом підземних вод. Численні великі водокористувачі отримали ліцензії на водокористування для того, щоб уповільнити зростання рівня ґрунтових вод і в кінцевому підсумку стабілізувати його. Також було зроблено додатковий водовідбір та постійний моніторинг РГВ для надання допомоги в управлінні рівнем ґрунтових вод. Після 2000–го року рівень ґрунтових вод стабілізувався [34, 35].

### **1.6.2 Аналіз досвіду України в боротьбі з підтопленням**

Як показала практика, попереджувальні заходи в нашій країні реалізуються тільки при будівництві особливо відповідальних об'єктів. В цілому ж недосконалість нормативно-правової бази, постійний брак коштів і відсутність зацікавленості як будівельних, так і експлуатуючих відомств призводить до необхідності боротьби вже з існуючим підтопленням.

Наприклад, згідно «Комплексної програми запобігання та ліквідації наслідків підтоплення території міста Коростеня на період 2011–2018 років» передбачені такі основні заходи:

- добудова водоспускних споруд зливової каналізації;
- відновлення функціонування водовідводів;
- реконструкція та ремонт гребель на річці Уж;
- ремонт мереж водопостачання та каналізації;
- оснащення аварійно-відновлювальних підрозділів комунально служби міста пересувними насосними установками;
- обмеження будівництва та господарської діяльності, що може призвести до тяжких еколого-економічних наслідків;
- посилення тенденцій водозбереження у всіх галузях економіки, особливо на об'єктах з мокрим технологічним процесом;
- запобігання аварійним ситуаціям на інженерних спорудах і мережах;
- проведення моніторингу підтоплених територій.

Таким чином, основна увага в боротьбі з підтопленням в цьому місті приділяється інженерним заходам.

В м. Харкові пропонувалось проводити планові обстеження підтоплених територій та складати матеріали обліку підтоплених територій, дані про результати обстеження вносити в «Паспорт підтопленого населеного пункту» та «Паспорт підтопленої території». За даними обстеження пропонувалось скласти карти умов проявлення процесів підтоплення, де враховуються підтоплені та потенційно підтоплювані території. Таке обстеження вперше було виконане на початку 1980–х років на території Харківської області. Наприкінці 1990–х років було проведено збір інформації лише по 6-ти районам Харківської області з метою уточнення обстановки на підтоплених територіях. На сьогоднішній день на території Харківської області повністю відсутня система контролю за станом підземних вод. Хоча в 1970–х роках на території міста Харкова було створено опорну режимну стаціонарну мережу моніторингу підземної гідросфери, яка включала в себе

близько 250 свердловин. Завдяки повній відсутності фінансування робіт з підтримки режимної мережі підземних вод у справному стані в межах міста, вона була повністю знищена вже у другій половині 1980-х років. [10]. Відомі дистанційні методи визначення зон підтоплення. Фізичною основою дистанційного визначення РГВ є вплив режимів поверхневого зволоження скін- шару, що вносить основний вклад у випромінювання, на радіаційно - вологісну залежність ґрунтового покриву в зонах фільтрації та підтоплення. Представлені методи використовуються для знімків ІК і радіодіапазоні. Перевага даних методів полягає в можливості систематичного отримання знімків в будь-який час. Обмеженням служать несприятливі метеоумови. Недоліком даних методів є незначна глибина визначення вологості ґрунтів, а також похибка вимірювань відносно контактного методу. Дистанційні методи дозволяють оперативно проводити моніторинг підтоплень та простежувати їх динаміку. Дистанційні методи застосовні по факту підтоплення, дозволяють локалізувати небезпечні зони та вжити захисних заходів [80]. Пропонувалось також створення постійно діючої гідрогеологічної моделі м. Харкова; регулювання русел річок в Харкові та області; упорядкування систем водовідведення; відновлення роботи підземних водозаборів, підтримка в працездатному стані, реконструкція та будівництво систем інженерного захисту в м. Харкові та області; організація програми економії води та мінімізації витоків з водопровідно-каналізаційних та теплових мереж та регулювання на обласному і міському рівнях умов ведення господарчої діяльності та проживання на підтоплюваних територіях [10]. Пропонувалась також розробка законодавчо-нормативної бази, проведення наукових досліджень підтоплених територій з використанням ГІС-технологій, підвищення кваліфікації служб МНС та ін. [81].

В Україні моделювання зміни РГВ для прогнозування підтоплення та боротьби з ним - доступний і ефективний інструмент, проте, його застосування вимагає достовірних вихідних даних, для чого необхідні відповідні дослідження. Найбільш важкими для визначення є параметри

вологпереносу в зоні аерації (потрібне проведення спеціальних водобалансових досліджень), які, в основному, кількісно визначають саме явище підтоплення. Крім того, балансові та модельні дослідження проводяться обмежено і, як правило, починаються вже на стадії розростання явища. Основними методами попередження підтоплення та методами зменшення шкоди від цього явища на сьогоднішній день в Україні залишаються інженерні методи. Попереджувальні заходи повинні проводитися на всіх потенційно підтоплюваних (відповідно до прогнозу) територіях, призначених для будівельного освоєння, вони входять в комплекс робіт з інженерної підготовки територій, а в окремих випадках можуть мати і самостійний характер. Вони включають в себе наступні види робіт [10, 82]:

- належну організацію та прискорення стоку поверхневих вод;
- штучне підвищення планувальних відміток території;
- облаштування захисної гідроізоляції заглиблених споруд, конструкцій і підземних комунікацій;
- спорудження профілактичних пристінних, пластових та супутніх дренажів;
- прокладку профілактичних вентиляційних каналів у підставах підземних споруд;
- ретельне виконання робіт з будівництва водогінних комунікацій і правильну їх експлуатацію з метою запобігання постійних і аварійних витоків;
- належну організацію складування відходів виробництва;
- створення протифільтраційних екранів в підставі накопичувачів і завіс навколо них;
- спорудження перехоплюючих підземний потік дренажів [38].

Частка міських земель в загальному балансі територій неухильно зростає у зв'язку з процесом урбанізації, що відбувається у всьому світі. Міста ростуть вшир навіть тоді, коли є територіальні ресурси всередині існуючих кордонів. Це пов'язано з бажанням освоїти найбільш цінні в

містобудівному відношенні території, залишаючи в резерві незручні землі, освоєння яких вимагає спеціальних інженерних рішень і великих капітальних витрат. У середині міської межі залишалися значні вільні площі, а межі міста розширювалися за рахунок освоєння периферії. У межах територій деяких міст не використовується понад 25% площі, яка, за відповідної інженерної підготовки, могла б бути забудована. У нових генеральних планах міст в більшості випадків передбачається освоєння незручних земель за рахунок здійснення комплексу заходів з інженерної підготовки територій, серед яких провідне місце займає дренаж [38]. Інженерна підготовка незручних земель до забудови здійснюється точково (локально). А необхідним для запобігання зміни водного балансу підземних вод повинно бути планування та проектування інженерних заходів регіонально. Тобто для ділянки під один будівельний об'єкт повинні бути запропоновані інженерні заходи, що охоплюють цілий квартал. Масштаб захисних заходів від підтоплення повинен перевищувати масштаби будівництва нового об'єкта в кілька разів.

### **1.6.3 Роль інженерних заходів в боротьбі з підтопленням на урбанізованих територіях**

Процес підтоплення на забудованій території формують відповідні техногенні умови, які часто створюють основні джерела живлення підземних вод. Встановлено, що формування підтоплення відбувається вже на початковій стадії будівництва [16, 17, 19, 27, 83], а саме при підготовці території до будівництва (вертикальне планування, прокладання доріг, що порушують раніше існуючий рельєф, а отже, і умови поверхневого стоку, розтин котлованів і траншей, пристрій різних водойм, прокладка тимчасових водогінних комунікацій і т. д.). Надалі при розвитку будівництва (прокладання постійних підземних комунікацій і їх випробування з одночасною експлуатацією тимчасових мереж, будівництво фундаментів, засипка котлованів і траншей розпушеним ґрунтом, прокладка дощової

каналізації і т.д.) і подальшої експлуатації споруд, порушення раніше сформованих гідрогеологічних умов інтенсифікується.

Зниження рівня ґрунтових вод урбанізованих територій інженерними методами:

- відведення частини поверхневого стоку в дощову каналізацію;
- робота міських водозаборів для використання відкачуваної води для технічних цілей;
- робота спеціальних водознижуючих пристроїв;
- зниження інфільтрації за рахунок екранування поверхні землі будівлями, асфальтовим та іншими покриттями. Відомо, що щільність міської забудови з урахуванням покриттів площ і доріг може в окремих районах міста досягати 90%.

Залежно від результатів прогнозу на освоєваних і освоєних територіях повинні проводитися ті чи інші заходи проти можливого, що розвивається або вже розвиненого підтоплення.

### **1.7 Аналіз існуючих рішень та проблем щодо боротьби з підтопленням**

На сьогоднішній день в Україні проблема підтоплення приймається як складена ситуація і основну увагу фахівців та управлінців направлено на ліквідацію наслідків [27]. В той же час, можливість попередження підтоплення за допомогою управлінських важелів практично не використовується. Однією з причин такого жалюгідного становища на Україні можуть бути значно вищий показник питомого водоспоживання в містах: 446–647 л(люд·доб) [83], що в кілька разів вище середнього показника для великих міст Світу – 153 л(люд·доб) [83]. До того ж, за останні два десятиліття на жителя України припадає вдвічі більше спожитої води, хоча кількість населення за ці роки неухильно зменшувалася. Найбільш ймовірною причиною цього може бути збільшення втрат з водогінних

комунікацій. Очевидно, має місце технічна зношеність і відсталість всіх водогінних комунікацій. Порівняльна характеристика підходів до боротьби з підтопленням наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика підходів до боротьби з підтопленням

Критерій оцінки	Управлінські заходи з попередження підтоплення	Інженерні заходи з ліквідації підтоплення
Економічний	Значно дешевше, ніж інженерні заходи	Значні економічні витрати, порівняно з управлінськими заходами
Соціальний	Вплив на населення мінімальний	Значний вплив на населення
Екологічний	Вплив на довкілля менше, ніж при використанні інженерних заходів	Вплив на довкілля значний
Час	Короткострокові та довгострокові проекти	Короткострокові та довгострокові проекти
Досягнення результату	Можливий потенційний результат	Видимий результат
Масштаб	Обмежений	Обмежений
Використання у Європі	Значно більше	Менше

Діяльність з попередження підтоплення є більш важливою, ніж його ліквідація. Пов'язано це з тим, що соціально-економічні результати превентивних дій із запобігання підтоплення (зниження втрат і збитків) можуть бути більш ефективними для громадян, суспільства і держави. З економічної точки зору це обходиться в десятки, а іноді й сотні разів дешевше, ніж ліквідація наслідків підтоплення. В Європейських державах пріоритетним є попередження підтоплення. Інженерні засоби боротьби з підтопленням передбачають значні фінансові витрати, довгострокові проекти, значний вплив на населення та довкілля. Першим етапом створення дренажної системи є проведення широкого спектру вишукувальних робіт, після чого проводиться вибір оптимального варіанту дренажної системи та складання робочої документації. Визначення оптимального варіанта безпосередньо залежить від ландшафтних та інженерно-геологічних умов.



Важливо повністю враховувати технологічні характеристики створюваної дренажної системи: шпаруватість і оптимальний діаметр дрен, зручність їх монтажу. На першому етапі також проводиться розрахунок трудомісткості допоміжних операцій: необхідність використання спеціальної підйомної техніки, наявність або відсутність фракційного обсіпання, характерні особливості пристрою системи спостережних і водозбірних колодязів. Тож інженерні заходи є трудомісткими та потребують багато часу та чисельної кількості узгоджень на їх реалізацію. Попереджувальні заходи наразі в Україні не є важелем вирішення проблеми підтоплення, тому що особливості менталітету українського народу, підхід до користування природними ресурсами, умови проживання людей, образ життя, підхід до прийняття рішень, виділення першочергових завдань, та розподілення коштів на вирішення проблем міста, зацікавленість у природоохоронній діяльності як самих мешканців, так і представників влади, координально відрізняється від європейського способу життя та світосприйняття. Необхідно враховувати, що ряд чинників, що призводять до підтоплення, не може бути передбачений у нормативних документах. Наприклад, відставання облаштування водовідвідних систем від будівництва водопроводів, облаштування навмисно негерметичних вигрібних ям у приватному секторі, експлуатація водогінних комунікацій з високим коефіцієнтом зносу, штучна підсипка доріг, використання водопровідної води населенням для поливу ділянок, збільшення щільності деревостану на окремих ділянках і т. д. У цьому випадку превентивних заходів буде вже недостатньо і зазвичай, для запобігання матеріального збитку необхідно спорудження дорогих дренажів.

Однак, багато з цих факторів можуть в тій чи іншій мірі регулюватися управлінськими заходами. Наприклад, щодо перерахованих вище факторів можуть застосовуватися такі управлінські заходи:

- зміна черговості ремонту і заміни водогінних комунікацій на користь районів, які страждають від підтоплення;

- залучення зовнішнього фінансування проектів у сферах водопостачання та каналізації, будівництва іригаційних та дренажних споруд, управління водними ресурсами річкових басейнів, а також в інших секторах, пов'язаних з використанням водних ресурсів;

- запровадження економічного стимулювання встановлення лічильників витрати води для населення (розумна ціна на воду без лічильників і з лічильниками);

- установка лічильників на магістральних водоводах, для обліку втрат при доставці води по комунальних мережах;

- організація перевірок стану вигрібів, санітарних розчищень зайвого деревостану і т. п.;

- при проектуванні нового будівництва необхідно враховувати негативний досвід розвитку підтоплення на даній території і передбачати адекватні заходи попередження підтоплення та відповідні правила експлуатації водопроводу, каналізації та теплових мереж;

- при проектуванні нового будівництва необхідно враховувати особливості ландшафтно-функціональних зон не тільки району забудови, але й прилеглої території;

- для обґрунтування управлінських заходів необхідне отримання об'єктивної картини про розвиток підтоплення. Для цього на ключових ділянках повинна бути обладнана мережа спостережних пунктів на базі спеціально обладнаних спостережних свердловин та гідрогеологічні моделі міст.

Відомі кілька методологічних підходів до розробки захисту від підтоплення підземними водами:

- природно-гідрогеологічний підхід. Прогнози та моделювання пов'язані із загальною і меліоративною гідрогеологією. В рамках цього підходу наукові роботи опублікували Авер'янов С. Ф., Барон В. А., Бочевер Ф. М., Кац Д. М., Лапшин М. М., Мироненко В. А., Полубарінова-Кочина П. Я., Розмова Г. А.,

Рудаков В. К., Усенко В. С., Шестаков В. М., Шкінкіс Ц. Н., Шульгін Д. Ф. та ін. [19, 52];

– техногенно-гідрологічний підхід (Абрамов С. К., Анпилов В. Є., Аравін В. І., Веригин М. М., Куранов Н. П., Муфтахов А. Ж., Недріга В. П., Нумеров В. М., Романов А. В., Саркісян В. С., Шевчик А. П., Шержуков Б. С. та ін.) [15, 18, 19];

– містобудівний підхід (Дегтярьов Б. М., Радищев П. В. та ін.) [19].

– імовірно-статистичний підхід (Болгов М. В., Дзекцер Е. С., Писаренко В. Ф., Поздняков С. П. та ін.) [16, 17];

– конструктивно-технологічний підхід (Сологаєв В. І.) [19].

### **1.8 Постановка завдань дослідження**

В Європейських державах основна увага приділяється попереджувальним заходам з підтоплення. Зокрема, використовуються прогнозні програми з використанням математичного моделювання, створюються гідрологічні моделі, проводиться оцінка ризиків підтоплення, контроль та управління джерелами поповнення ґрунтових вод, контроль за водовідбором, моніторинг підтоплених та потенційно підтоплюваних земель, контроль за виконанням та впровадженням нових технологій щодо попередження підтоплення. Більшість вишукувань фінансується та підтримується державою. Бази даних є прозорими та загальнодоступними. В європейських дослідженнях простежується залежність впливу повені на ґрунтові води для міст, створених в заплавах річок, та впливу ґрунтових вод на повені. Дослідна робота ведеться при взаємній роботі моделей ґрунтових вод та річки конкретного міста. Проблема підтоплення розглядається комплексно. Проблема підтоплення урбанізованих територій на Україні посилюється вкрай зношеним станом водопровідно-каналізаційних та теплових мереж і високим питомим водоспоживанням у всіх сферах господарства, що не дозволяє її вирішувати

звичайними превентивними заходами, які використовуються при будівництві об'єктів. Альтернативою будівництву дорогих дренажів в цих умовах можуть бути організаційні заходи, закликані зменшити втрати води і підвищити культуру водоспоживання та водовідведення на забудованих територіях. Моделювання зміни РГВ в міських районах є ефективним засобом для комплексної оцінки ризиків підтоплення та управління статтями водного балансу підземних вод. Таким чином, доцільним є підвищення рівня екологічної безпеки урбанізованих територій, що зазнають вплив підтоплення ґрунтовими водами, за рахунок наукового обґрунтування методів та засобів прогнозування розвитку підтоплення.

Досягнення поставленої мети можливе вирішенням наступних наукових завдань:

- оцінити величину додаткового живлення в ґрунтові води природно-техногенної геосистеми великого міста;
- дослідити фактичну зміну РГВ у великому місті за багаторічний період;
- розробити математичну модель зміни рівня ґрунтових вод в прямій та зворотній задачі, що враховує вплив штучних покриттів поверхні ґрунту і евапотранспірацію;
- спрогнозувати максимально високі РГВ для забудованих територій за допомогою розробленої моделі;
- для забезпечення екологічної безпеки автодоріг, що зазнають підтоплення ґрунтовими водами, науково обґрунтувати параметри протифільтраційної завіси;
- науково обґрунтувати методологію управління РГВ та попередження підтоплення для підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій.

## РОЗДІЛ 2

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА ОПИС МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1 Характеристика об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження є зміни рівнів ґрунтових вод природно-техногенних геосистем великих міст (на прикладі м. Харків). Середній рівень ґрунтових вод для м. Харків дорівнює від 0,2 до 10 м, а для значної частини території менше 2 м, що відповідає екологічно небезпечному підтопленому стану міської території. Карта підтоплення центральної частини м. Харкова надана на рис. 2.1.

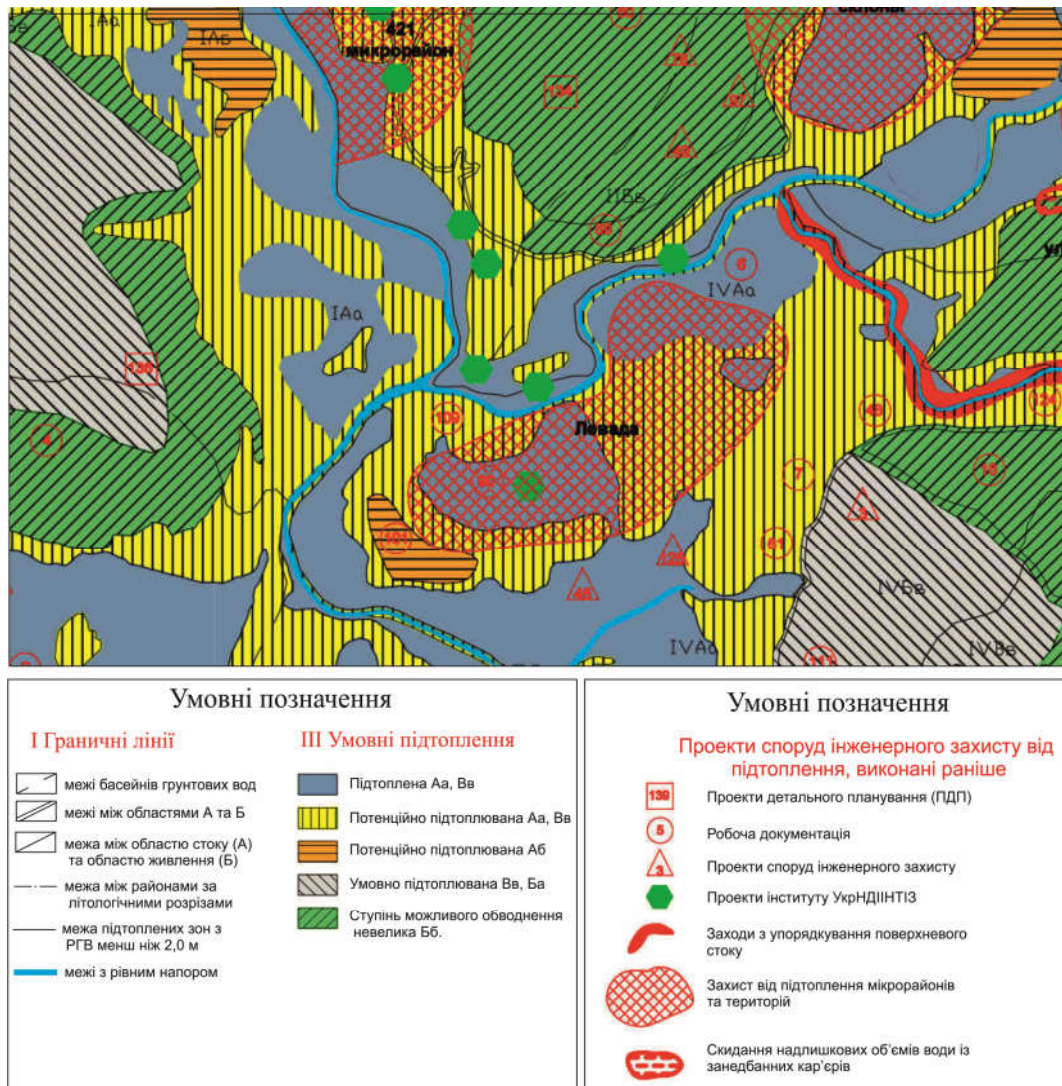


Рисунок 2.1 – Карта підтоплення центральної частини м. Харкова

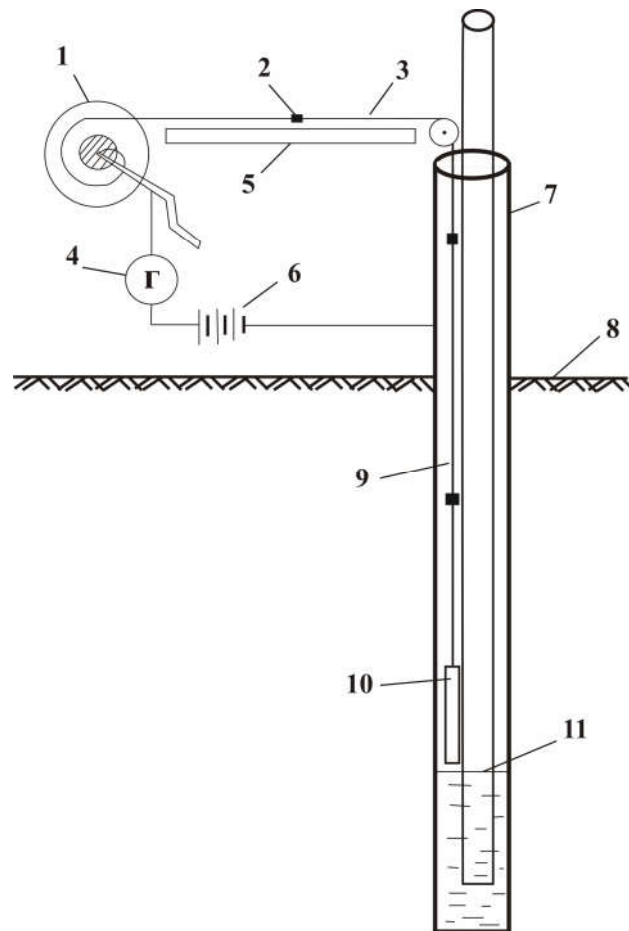
Місто розташоване в басейні р. Сіверський Донець на злитті річок Уди, Лопань і Харків. Територія м. Харкова характеризується, насамперед, неоднорідністю забудови, різними умовами землекористування, наявністю багатоконпонентних функціональних зон – сельбищної, промислової, рекреаційної, зеленої, складської і так далі, а також наявністю чисельних транспортних артерій та інженерних комунікацій. У межах кожної окремо взятої функціональної зони є своя різноманітність, пов'язана з типом забудови (багатопверхова, одноповерхова, стара, нова), схемами інженерних мереж, організацією рельєфу, благоустроєм, озелененням та щільністю забудови. Територія міста є різноманітною за геоморфологічною, геологічною та гідрогеологічною будовою, тут діють майже всі типові антропогенні фактори впливу на гідрогеологічне середовище, а відчутний антропогенний вплив спостерігається вже багато років. Тому вивчення і прогнозування гідрогеодинамічної складової є актуальним для оцінки екологічного стану м. Харків та інших урбанізованих територій.

З'ясовано, що більша частина мережі наглядових свердловин в м. Харків, яка створена в 80-ті роки для контролю РГВ вийшла з ладу. Згідно офіційних джерел, водопостачання міста Харкова з підземних джерел офіційно припинилося та спостереження за рівнями підземних вод не відбувається [14]. В цих умовах об'єктивні дані про зміну РГВ вкрай збідніли. Більша частина з наявних – це уривчасті дані на локальних об'єктах будівництва з короткими рядами спостережень. Для виявлення реальних змін РГВ, автором були проведені натурні дослідження зміни РГВ на прикладі м. Харків за 2004–2017 рр. Автор брала участь в якості робочого спостерігача Геологічної партії в роботі з 3–ма режимними водопунками м. Харків, які були доступними для досліджень.

Для вимірювання глибини залягання рівня води в спостережних гідрогеологічних, експлуатаційних та інших свердловинах використовуються різні рівнеміри. Вимірювання рівня можна розділити на 2 методи: контактний і безконтактний. До першого можна віднести: ємнісний,

поплавковий, гідростатичний, буйковий. До безконтактних: зондування електромагнітним випромінюванням, зондування звуком, а також зондування радіаційним випромінюванням. Вимірювання РГВ в спеціально обладнаних і пристосованих для цього свердловинах проводились за допомогою рівнеміра ГРУ–100 з періодичністю 1 раз на місяць протягом 2004–2017 рр.

Рівнемір конструктивно являє собою котушку з мірним тросом (позначки по 1 м) з електродом на кінці. При контакті з водою загоряється світлодіод або подається звуковий сигнал (рис. 2.2).



1 – барабан, 2 – бірка, 3 – рейка, 4 – гальванометр, 5 – шкала на рейці, 6 – батарейка, 7 – свердловина, 8 – рівень поверхні землі, 9 – трос, 10 – електрод,  
11 – рівень ґрунтових вод

Рисунок 2.2 – Рівнемір

Статистична обробка даних була виконана з визначенням максимальних, мінімальних та середніх значень рівнів, стандартних

відхилень, коефіцієнтів варіацій по кожному ряду спостережень. Водопункти, що розглядаються (рис. 2.3), знаходяться посеред приватного сектору, де більша частина території незабудована та озеленена, що сприяє інтенсифікації процесу евапотранспірації.

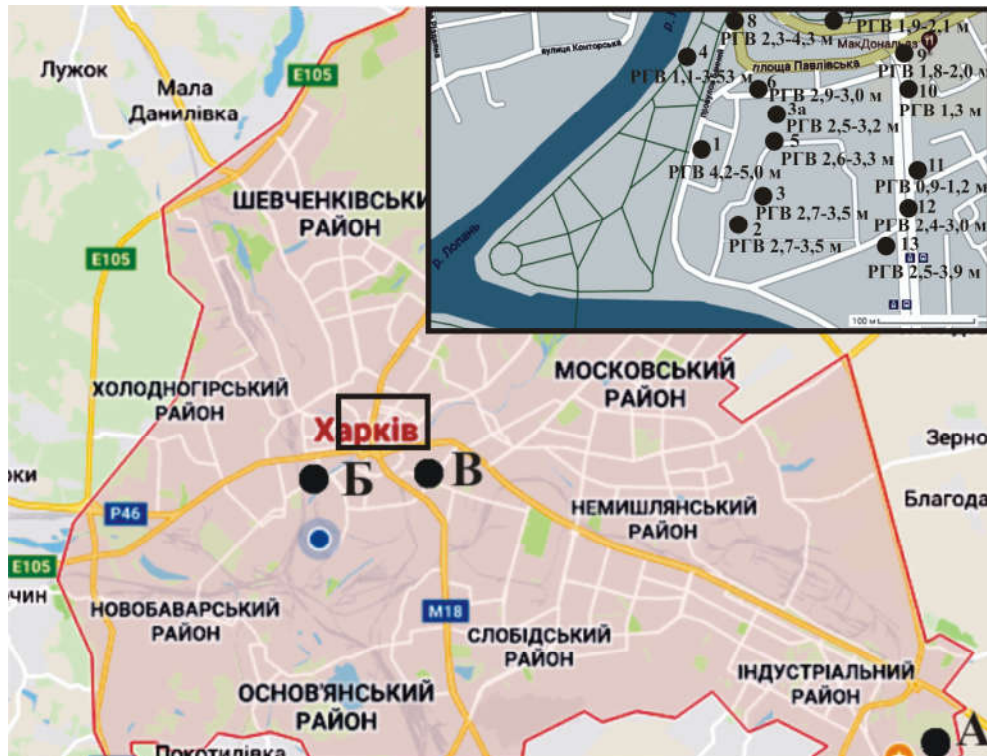


Рисунок 2.3 – Карта точок контролю за станом рівня ґрунтових вод

Точка А – свердловина, обладнана на першій від поверхні пліоцен-межигірський водоносний горизонт на водозаборі ТОВ «САН ІНБЕВ Україна». Координати: 49,9077 ПШ; 36,4286 СД. Абсолютна відмітка гирла свердловини – 166,54 м. Точка Б – свердловина, обладнана на алювіальний четвертинний водоносний горизонт по вул. Конторській (раніше Червоножовтнева). Координати: 49,9325 ПШ; 36,3741 СД. Абсолютна відмітка гирла свердловини 171 м. Точка В – свердловина, обладнана на алювіальний четвертинний водоносний горизонт, м. Харків, вул. О. Невського. Координати: 49,9736 ПШ; 36,2466 СД. Абсолютна відмітка гирла свердловини 108 м.

Інша ділянка досліджень розташована в історичній центральній частині міста Харкова, обмежена пров. Банним, площами Пролетарською,



Павлівською та Рибною, вул. Університетською. Геоморфологічно ділянка розташована в межах заплави біля злиття р. Лопань і р. Харків. Рівень води в річках регулюється Гончарівською греблею з відміткою НПГ 100,5 м. Інтенсивна забудова цієї території спричинила додаткові техногенні фактори впливу на підвищення РГВ. Інженерно-геологічні вишукування на цій ділянці проводились Українським головним виробничим НДІ інженерно-технічних та екологічних вишукувань (УкрНДПНТІЗ) в період з 1965 по 2016 рр. Всі наведені точки контролю знаходяться в одному водоносному горизонті (прямокутник на рис. 2.3). Автором було проаналізовано дані багаторічних спостережень за рівнями ґрунтових та процесом поширення площ підтоплення та встановлено, що на теперішній час в Україні немає уніфікованих критеріїв для оцінки площ підтоплених земель. В національних доповідях «Про стан навколишнього природного середовища в Україні» і «Про стан техногенної та природної безпеки в Україні» до фонду підтоплених віднесені потенційно підтоплені землі, що суперечить даним моніторингу екзогенно-геологічних процесів інформаційних щорічників та досліджень науковців. Оцінки площ підтоплення в різних джерелах відрізняються приблизно на 10%. Тому організація моніторингу та прогнозів підтоплених та потенційно підтоплених територій, які чітко не розмежовані, встановлення та дотримання режимів господарської діяльності на цих територіях значно ускладнюється.

## **2.2 Методика дослідження впливу техногенних чинників на величину додаткового живлення ґрунтових вод міських територій**

Інтенсивність підтоплення не залежить від широтного розташування міст на території країни, а є функцією чисельності населення населених пунктів і величини територіальної концентрації водоспоживання. Оскільки міста знаходяться в різних геоморфологічних і гідрогеологічних умовах, правомірним є припущення про наявність універсального фактора, який

призводить до підтоплення міст. Таким фактором є, насамперед, додаткове живлення в підземні води, обумовлене техногенезом.

В роботі було проведено кількісне визначення впливу різних чинників на величину додаткового живлення ґрунтових вод у межах селітебних і промислових територій, яке здійснено на прикладі м. Харків, що прийнятий як мегаполіс, а окремі його території можуть розглядатись як типові для поширення результатів досліджень на інші міста з населенням близько 250 тис. Охарактеризовано природні і техногенні умови та обґрунтовано техногенні фактори, що призводять до підвищення РГВ. Враховувались такі техногенні чинники поповнення ґрунтових вод, як втрати з систем водопостачання та водовідведення міста, втрати з теплових мереж.

Глибина освоєння підземного простору в межах міста сягає десятків і сотень метрів. Верхній рівень, що розглядається в роботі, охоплює інтервал 0–10 м. На цьому рівні розміщуються підземні частини більшості будинків і споруд промислових і цивільних об'єктів, інженерні мережі комунікацій, каптажне обладнання дренажних систем. Цю частину відрізняє поширення максимальних амплітуд сезонних і багаторічних коливань вологісних, температурних, гідродинамічних і багатьох інших показників. З цією зоною пов'язано розвиток цілого ряду негативних геологічних процесів, серед яких підтоплення, заболочування, просадки, суфозія, утворення агресивних середовищ та ін. [10, 15]. Визначено ряд техногенних причин підвищення РГВ для урбанізованих територій:

- втрати з водних комунікацій: системи водопостачання, каналізаційних та теплових мереж;

- штучно створений безстічний рельєф, зумовлений підсипкою та підняттям поверхні проїзної частини доріг та тротуарів, що створює умови локального накопичення поверхневого стоку та підвищення РГВ під впливом цього додаткового живлення;

- баражний ефект пальних полів, метрополітену і інших комунікацій глибокого закладення, що перешкоджає розвантаженню ґрунтових вод;

- захаращення і засипання водовідвідних каналів, що сприяє створенню безстічного рельєфу та локальному підвищенню РГВ в зоні накопичення поверхневого стоку;
- створення підпору річок греблями, замулювання русла і зниження пропускної здатності річок, каналізування малих річок та струмків;
- неконтрольований водовідбір;
- недостатність або відсутність зливової каналізації, що створює умови локального підтоплення за рахунок додаткового живлення від поверхневого стоку;
- наявність великих площ, що мають тверде покриття, яке зменшує транспірацію та випаровування у вегетаційний період і створює додаткове живлення за рахунок конденсації вологи у зимовий період.[10, 72].

Вплив антропогенних чинників зазвичай має невпорядкований характер, а отримання необхідної і достатньої кількісної інформації про них потребує значних витрат.

Порівняємо величини природної інфільтрації та додаткового живлення (Додаток Б) міської території на прикладі м. Харків та окремо визначених територіях.

Згідно з оцінкою при виконанні геолого-розвідувальних робіт на підземні води характерною величиною додаткового живлення у південно-східній частині Харкова є 82–111 мм/рік [83]. Згідно інших джерел [82] додаткове живлення в цілому по площі Харкова складає 36,5–292 мм/рік.

Наявні дані лізіметричних досліджень є тільки для території Київської області, в якій природні умови подібні умовам території м. Харків. Середньодобове багаторічне живлення ґрунтових вод за даними лізіметричних досліджень Коднянської дослідної ділянки в с. Ружки Житомирської області при сумарній річній кількості опадів 600 мм/рік, складає  $0,5 \cdot 10^{-4}$  м/доб, а за даними станції «Феофанія» у с. Хотів на околиці м. Києва з сумарною річною кількістю опадів 560 мм/рік, складає  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м/доб. Сумарна річна кількість опадів в м. Харкові 525мм/рік, тому виходячи

з аналогії за кількістю опадів і загальних природних умов територій обираємо найбільш наближену до умов Харкова величину багаторічного живлення ґрунтових вод –  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м/доб (54,75 мм/рік).

Розглянемо на прикладі великого промислового міста Харкова вплив втрат води з водопровідних мереж на додаткове живлення ґрунтових вод [43]. Дані щодо водозабору з поверхневих та підземних джерел, а також технологічні втрати води з водних комунікацій, представлені в Додатку Б табл. Б.1 [26].

Таким чином, втрати з системи господарсько-питного водопостачання становлять в середньому 40% (105174,4 тис м<sup>3</sup>/рік) від об'єму води, що подається в місто. Витоки води з системи каналізації складають 20% від об'єму води, що подається в місто. Втрати води з теплових мереж складають половину втрат з системи водопостачання. [26]. Підсумовуючи об'єми витоків з каналізаційних і теплових мереж, а також мереж водопостачання, отримуємо 210348,8 тис. м<sup>3</sup>/рік.

Порівнюючи додаткове живлення з втратами води з водних комунікацій, можна зробити висновок, що втрати з водних комунікацій перевищують додаткове живлення підземних вод у 2–5 разів і тому являють собою головне джерело для останніх [85]. В той же час у джерелі [84] вказані дані щодо додаткового живлення по (292 мм/рік), що перевищує об'єм втрат води з комунікацій. Це, з однієї сторони, свідчить про відсутність єдиного підходу до кількісної оцінки додаткового живлення ґрунтових вод, а з другої може вказувати на наявність інших джерел додаткового живлення ґрунтових вод, якими можуть бути локальні витоки води з бризкальних басейнів, градирень і т. д., крім того, при безконтрольній роботі водозабірних колонок і кранів на поверхні землі накопичується вода, яка, інфільтрується в ґрунт та служить додатковим джерелом живлення ґрунтових вод.

Середня річна кількість опадів м. Харкова становить 525 мм/рік. Інфільтрація атмосферних опадів в ґрунтові води для району Харкова становить 114 мм/рік або  $3,12 \cdot 10^{-4}$  м/доб, що відповідає надходженню на

площі міста (310 км<sup>2</sup>) 35302,8 тис м<sup>3</sup>/рік. Додаткове живлення, яке обумовлено техногенними факторами, практично в 6 разів перевищує природну інфільтрацію. Тож, додаткове живлення є лідируючим чинником поповнення ґрунтових вод для м. Харкова та у великих містах. Це є причиною підвищення рівня ґрунтових вод і підтоплення міста.

В Україні станом на 2012 р. загальна протяжність водопровідних мереж становила 135958 км, з них потребували заміни 51855 км (38,1%), було замінено протягом року 999 км (лише 1,9% від потреби). Відсоток зношеності водопровідних споруд в різних регіонах України становить від 30% до 70%.

Загальна протяжність каналізаційних мереж у 2012 р. складала 44832,8 км, з них потребували заміни 17187,4 км (38,3%), замінено протягом року 179,6 км (1% від потреби). Несвоєчасність проведення капітальних та поточних планово-профілактичних ремонтів мереж є причиною постійного зростання втрат з водопровідних мереж та розвитку підтоплення [28].

### 2.3 Методика оптимізації статей водного балансу ґрунтових вод

Методика оптимізації статей водного балансу ґрунтових вод, що розроблена в роботі, включає методи ранжування факторів підтоплення за значимістю впливу. Найвпливовішому фактору був призначений перший ранг, найменш впливовому – 5-й ранг. Сумарна дія всіх провідних факторів складає 100%. Значення кожного фактора у % та ранжування факторів підтоплення за значимістю впливу, відповідно до розрахунків [24], наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Ранжування факторів підтоплення за значимістю впливу

Ранжування факторів за значимістю впливу	Найменування фактору впливу на ґрунтові води	Позначення літерою фактора впливу	Числове значення, м/доб	Значення у %
--	--	-----------------------------------	-------------------------	--------------

1	Додаткове живлення	$f_1$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	89,786
2	Кількість опадів, що інфільтруються в ґрунтові води	$s_1$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	7,088
3	Водовідбір	$k_1$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	3,119
4	Інтенсивність випаровування	$d_1$	$8,75 \cdot 10^{-8}$	0,004
5	Інтенсивність транспірації	$g_1$	$6,25 \cdot 10^{-8}$	0,003

Відповідно методам варіаційної статистики згідно [24] та враховуючи, що техногенні фактори мають 1-й і 3-й ранг і піддаються значним змінам, то змоделюємо 5 варіантів можливого впливу техногенних факторів на рівень ґрунтових вод. При цьому зменшення значущості впливу додаткового живлення на водний баланс на 10% у кожному наступному випадку, і збільшення значимості впливу водовідбору на 10% відбувається до тих пір, доки водовідбір не перевищить додаткове живлення. У таблицях 2.2 та 2.3 надано варіанти значимості впливу техногенних факторів на рівень ґрунтових вод, згідно наших розрахунків.

Таблиця 2.2 – Значимість впливу техногенних факторів на рівні РГВ у % для м. Харків

№з/п	Найменування фактору впливу на ґрунтові води	Розраховане значення у%	1 варіант, %	2 варіант, %	3 варіант, %	4 варіант, %	5 варіант, %
1	Додаткове живлення	89,786	79,786	69,786	59,786	49,786	39,786
2	Водовідбір	3,119	13,119	23,119	33,119	43,119	53,119

Таблиця 2.3 – Значимість впливу різних техногенних факторів на баланс ґрунтових вод у Харкові

№ п/п	Найменування фактору впливу на ґрунтові води	Чисельне значення, м/доб	1 варіант, м/доб	2 варіант, м/доб	3 варіант, м/доб	4 варіант, м/доб	5 варіант, м/доб
1	Додаткове живлення	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$
2	Водовідбір	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
$\Delta h$		0,00007	0,000065	0,000054	0,000033	0,000021	0,000012

За результатами ранжування та проведеного математичного моделювання для підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій, що зазнають підтоплення, в табл. 2.4 наведено прогноз зміни РГВ на 50 років.

Таблиця 2.4 – Прогноз зростання РГВ на території м. Харків на різні періоди часу

	Інтервал часу	Доба	1 рік	10 років	20 років	30 років	40 років	50 років
	Зміна РГВ							
Вихідна ситуація	$\Delta h_0$	0,00007 м	0,030 м	0,3 м	0,6 м	0,9 м	1,2 м	1,5 м
Варіант 1	$\Delta h_1$	0,000065 м	0,024 м	0,24 м	0,48 м	0,72 м	0,96 м	1,2 м
Варіант 2	$\Delta h_2$	0,000054 м	0,020 м	0,2 м	0,4 м	0,6 м	0,8 м	1,0 м
Варіант 3	$\Delta h_3$	0,000033 м	0,012 м	0,12 м	0,24 м	0,36 м	0,48 м	0,6 м
Варіант 4	$\Delta h_4$	0,000021 м	0,008 м	0,08 м	0,16 м	0,24 м	0,32 м	0,4 м
Варіант 5	$\Delta h_5$	0,000012 м	0,004 м	0,04 м	0,08 м	0,12 м	0,16 м	0,2 м

Обробка результатів спостережень проводилася методом варіаційної статистики, результати випробувань зведені в таблиці. Розглянуто 6 випадків впливу техногенних факторів на РГВ, при цьому коефіцієнт варіації дорівнював 26,5%. Досліджувану сукупність можна вважати однорідною, оскільки коефіцієнт варіації не перевищує 33%, згідно [24].

З метою оптимізації водного балансу підземних вод для забезпечення екологічної безпеки підтоплених територій великого міста, було проведено балансування видаткових та прибуткових статей. Балансування відбувається при зниженні додаткового живлення в 2,4 рази, тобто додаткове живлення необхідно зменшити в середньому на 240 000 м<sup>3</sup>/добу, а також при збільшенні водовідбору з першого від поверхні водоносного горизонту в середньому в 15 разів, тобто при збільшенні водовідбору в межах м. Харків в середньому на 300 000 м<sup>3</sup>/добу. На збільшення водовідбору на 300 000 м<sup>3</sup>/добу необхідно витратити 24 000 кВт·ч, що відповідає 48 тис. грн/доб.

Оскільки якість ґрунтових вод у м. Харків невисока, розрахований об'єм води може бути використаний для технічних цілей, або для обводнення річок.

## 2.4 Методи математичного моделювання зміни рівня ґрунтових вод забудованих територій

В роботі було розроблено математичну модель, в якій застосовано математичні методи аналітичного розв'язання диференціальних рівнянь фільтрації із залученням комп'ютерної програми Maple. Були застосовані рівняння фільтрації Верігіна М. М., диференціальні рівняння жорсткої фільтрації Муфтахова А. Ж. та інш.

### 2.4.1 Диференціальні рівняння фільтрації

У найбільш загальному вигляді з адекватним фізичним змістом диференційні рівняння фільтрації вивів і опублікував в 1922 р. Павловський М. М. [86]. Використовуючи формулу М. В. Остроградського - Д. Гріна, він отримав узагальнене диференційне рівняння нерозривності для стисливої рідини, що фільтрується у пористому середовищі, яке деформується

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

з характеристичними рівняннями, що виражають залежності щільності рідини від тиску

$$\rho = f(p) \quad (2.2)$$

і пористості середовища від тиску

$$n = f(p). \quad (2.3)$$

Тут  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  – компоненти вектору швидкості фільтрації відповідно декартових осей координат OX, OY, OZ,

де OZ – вертикальна вісь;

$t$  – час;



$x, y, z$  – координати точки.

При постійній густині рідини ( $\rho = \text{const}$ ), Павловський Н. Н. отримав такий варіант рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2.4)$$

що при сталій пористості ( $n = \text{const}$ ), тобто при нестисливому пористому середовищі переходить в рівняння Лапласа

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0, \quad (2.5)$$

де коефіцієнт фільтрації змінний і може бути представлений у вигляді:

$$k = f(x, y, z). \quad (2.6)$$

Рівняння (2.5) при  $k = \text{const}$  можна записати як дивергенцію вектора швидкості фільтрації у вигляді

$$\text{div} V = 0. \quad (2.7)$$

Для однорідного ізотропного нестисливого пористого середовища ( $k = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ) маємо рівняння Лапласа, в якому невідомою функцією є фільтраційний напір

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0, \quad (2.8)$$

Рівняння (2.5) придатне для опису стаціонарної напірної і безнапірної фільтрації нестисливої води в пористому середовищі, яке не деформується. Рівняння (2.4) визначає нестаціонарну жорстку фільтрацію безнапірних потоків з вільною поверхнею. При цьому має бути додана умова на вільній поверхні, наприклад на РГВ. Взагалі, за наявності залежності швидкості фільтрації від вертикальної координати  $z$ , рівняння (2.5), згідно з Полубариновой-Кочиной П. Я. [21–23] відноситься до так званої гідродинамічної теорії фільтрації.

У 1969–70 рр. Верігін М. М. [53] зробив додаткові дослідження з аналізу рівнянь фільтрації підземних вод. Він отримав цікавий результат: при

гідрогеологічних прогнозах на строк  $t \leq 30$  років можна без істотних похибок у визначенні напору (помилка не більше 5%) використовувати диференціальне рівняння, аналогічне рівнянню теплопровідності (рівняння Фур'є):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a \nabla^2 H \quad (2.9)$$

де  $a$  – коефіцієнт пьезопроводності або рівнепроводності залежно від типу фільтраційного потоку, відповідно, напірного або безнапірного (з вільною поверхнею). При цьому Верігін М. М. привів й іншу обмежувальну умову застосування рівняння (9):

$$a \leq 10^5 \text{ м}^2/\text{доб.}$$

Обидві умови, які використовують час прогнозу  $t$  і коефіцієнт  $a$ , практично не обмежують сферу застосування диференціального рівняння (9). Це дозволило Верігину М. М. зі співавторами отримати низку розв'язків диференціального рівняння (9) за різні граничні умови. Отримані аналітичні формули відносяться до лінійної теорії фільтрації або гідравлічної теорії. Область застосування цих залежностей визначена авторами колективної монографії для фільтраційних розрахунків гідромеліоративних систем сільського господарства. Слід зазначити, що багато розв'язків Верігіна застосовано і для міського будівництва.

Муфтахов А. Ж. [18] застосував формулювання задач у вигляді наступних систем диференціальних рівнянь жорсткої фільтрації:

а) плоска в розрізі фільтрація

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial x^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0; \quad i=1,2; \quad \gamma_i^2 = \frac{k_{zi}}{k_{xi}} \quad (2.10)$$

б) осесиметрична в розрізі фільтрація

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_i}{\partial r} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0; \quad i=1,2; \quad \gamma_i^2 = \frac{k_{zi}}{k_{ri}}$$

або

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial H_i}{\partial r} \right) + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0$$

(2.11)

в) тривимірна фільтрація

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} = 0; \quad i=1,2; \quad \gamma_i^2 = \frac{k_{zi}}{k_{ri}} \quad (2.12)$$

Тут  $x, y, z$  – декартові координати, причому  $z$  по вертикалі;  $r$  – горизонтальна циліндрична координата;  $h_i$  – фільтраційний напір у  $i$ -тому шарі;  $i = 1$  для верхнього шару;  $i = 2$  для нижнього шару;  $\gamma_i$  – коефіцієнт анізотропії для  $i$ -того шару;  $k_{zi}$  – коефіцієнт фільтрації у вертикальному напрямку для  $i$ -того шару;  $k_{xi}, k_{ri}$  – коефіцієнти фільтрації в горизонтальному напрямку для  $i$ -того шару.

Умова на вільній поверхні РПВ, що знаходиться у верхньому шарі, була записана Муфтаховим А. Ж. в лінеаризованому вигляді

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{k_{z1}}{\mu_1} \cdot \frac{\partial h_1}{\partial z} - \frac{\omega(\eta)}{\mu_1} = 0,$$

(2.13)

де  $\eta$  – узагальнена координата,  $\eta = x$  для плоскої в розрізі фільтрації,  $\eta = r$  для осесиметричної;  $\mu_1$  – коефіцієнт водовіддачі або нестачі насичення верхнього шару відповідно при зниженні або підвищенні РГВ;  $\omega$  – інфільтраційне живлення водоносного пласта (додаткове живлення), залежне від координати  $\eta$ . Величину  $\omega$  називають також додатковою інфільтрацією або інтенсивністю додаткової інфільтрації. Звернемо увагу, що напір на вільній поверхні записаний як  $h_1$ , а не  $H_1$ , тобто він відраховується від горизонтальної площини  $0-0$ , проведеної через покрівлю підстиляючого водотриву. Із застосування рівняння плоскої фільтрації (2.4) запропоновано математичну модель зміни РГВ з уперше визначеними крайовими умовами, що враховують вплив штучних покриттів поверхні ґрунту та евапотранспірацію.

Для моделювання розглянуто рівняння фільтраційного напору у випадку плоскої фільтрації, яке може бути базовим для створення математичної моделі опису змін РГВ, якою можна врахувати фактори штучних покриттів та евапотранспірації.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (2.14)$$

де  $h$  – рівень ґрунтових вод,  $x$ ,  $y$  – координати, показані на рис. 2.4,  $\gamma$  – коефіцієнт анізотропії.

На території багатьох міст України значну площу займають штучні дорожні покриття і будови, що перешкоджають природним процесам інфільтрації атмосферних опадів, випаровування та транспірації. Тому при моделюванні зміни рівня ґрунтових вод враховано існування таких ділянок території, що частково покриті штучними покриттями, де вплив природних і техногенних факторів буде відбуватися лише на незабудованій поверхні цієї ділянки.

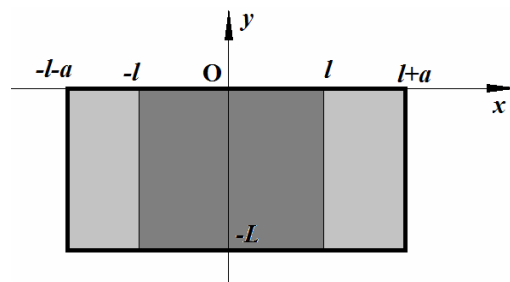


Рисунок 2.4 – Схема розрахункової області для визначення РГВ.

Припустимо, що на ділянках  $[-l-a \div -l]$  та  $[l \div l+a]$  відбувається вплив природних і техногенних факторів на зміну рівня ґрунтових вод; в той час як на ділянках  $[-l \div 0]$  та  $[0 \div l]$  впливу на рівень ґрунтових вод не відбувається завдяки штучним покриттям (рис. 2.4). Тоді, враховуючи, що зовнішня нормаль на відрізку  $[-l \div l]$  при  $y = -L$  співпадає з протилежним напрямком осі  $Oy$ , маємо таку граничну умову, що характеризує наявність штучних покриттів:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{-l \leq x \leq l, y = -L} = 0.$$

На ділянках  $[-l-a, -l]$  та  $[l, l+a]$  відбувається інфільтрація, водовідбір, транспірація і випаровування, тому маємо

$$-\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{l \leq x \leq l+a, y = -L} = f_1 + s_1 - g_1 - d_1 - k_1,$$

де  $f_1$  – додаткове живлення ґрунтових вод (прибуткова частина балансу ґрунтових вод);  $s_1$  – кількість опадів, яка інфільтрується в ґрунтові води (прибуткова частина балансу ґрунтових вод);  $g_1$  – інтенсивність транспірації (видаткова частина балансу ґрунтових вод);  $d_1$  – інтенсивність випаровування (видаткова частина балансу ґрунтових вод);  $k_1$  – водовідбір з ґрунтових вод (видаткова частина балансу ґрунтових вод). Аналогічну умову ставимо на ділянці  $[-l-a, -l]$  при  $y = -L$ , позначаючи відповідні параметри водного балансу з індексом 2. В подальшому використовуємо симетричну модель, тому вважаємо, що

$$f_1 = f_2; s_1 = s_2; g_1 = g_2; d_1 = d_2; k_1 = k_2.$$

Отримаємо

$$-\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{l \leq x \leq -l-a, y = -L} = f_2 + s_2 - g_2 - d_2 - k_2,$$

Оскільки зміна рівнів ґрунтових вод та їх розповсюдження є локальним, і моделювання проводиться для обмежених ділянок міської території (промислових об'єктів, будівель і т. ін.), з однорідними гідрогеологічними умовами, то можна прийняти, що боковий приплив і відтік рівні між собою, тому

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=l+a} = e_1(y) \\ \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=-l-a} = e_1(y) \end{cases}, e_1(y) = \frac{2}{1 + (y/y_{50})^\tau}, \quad (2.15)$$

де  $\tau$  – відносна мінливість потенційної транспірації;  $y_{50}$  – параметр, що характеризує висоту капілярного всмоктування води;  $y$  – глибина, де

відбувається тиск вологи, який всмоктує. У розрахунках прийнято значення  $\tau = 2,2$ . У подальших розрахунках прийнято, що  $y_{50} = 3$ , тобто вважалось, що  $L = 6$  м. Якщо евапотранспірація не враховувалась, то значення  $L$  обговорюються окремо. Початковий рівень приймається за точку відліку,  $h=0$ .

$$h \Big|_{y=0} = 0.$$

Таким чином, сформульовано таку крайову задачу для визначення невідомої функції  $h(x, y)$ . Знаходимо розв'язок диференційного рівняння

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

при таких крайових умовах:

$$\frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{-l \leq x \leq l, y = -L} = 0, \quad (2.16)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{l \leq x \leq l+a, y = -L} = f_1 + s_1 - g_1 - d_1 - k_1, \quad (2.17)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{l \leq x \leq -l-a, y = -L} = f_2 + s_2 - g_2 - d_2 - k_2, \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=l+a} = e_1(y) \\ \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=-l-a} = e_1(y) \end{cases}, \quad (2.19)$$

де функція  $e_1(y) = \frac{2}{1 + (y/y_{50})^\tau}$  визначена в (4.2).

Зауважимо, що неможливо побудувати одну систему базисних функцій для цієї крайової задачі з неоднорідними крайовими умовами на трьох межах. Тому в роботі запропоновано шукати невідому функцію  $h(x, y)$  у вигляді суми двох доданків

$$h(x, y) = h_1(x, y) + h_2(x, y).$$

Кожній функції  $h_i(x, y)$ ,  $i = 1, 2$  відповідає своя крайова задача, при чому в кожній з цих задач наявні однорідні граничні умови, що дає змогу побудувати системи незалежних базисних функцій. Такий засіб не лише дозволяє побудувати розв'язок сформульованої крайової задачі (1), (3) – (6), що враховує наявність штучних покриттів, інфільтрацію, випаровування та транспірацію, а також ефект евапотранспірації, але й дослідити окремо вплив штучних покриттів та ефект евапотранспірації. Так, крайова задача для функції  $h_1(x, y)$  описує наявність штучних покриттів, інфільтрацію, випаровування та транспірацію, але не враховує ефект евапотранспірації в залежності від глибини. Цю задачу сформулюємо наступним чином:

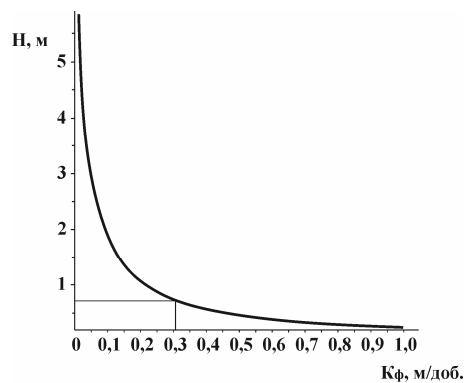
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} + \gamma^2 \frac{\partial^2 h_1}{\partial y^2} = 0, \\ h_1 \Big|_{y=0} = 0, \\ \frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{-l \leq x \leq l, y = -L} = 0, \\ -\frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{-l-a \leq x < -l, y = -L} = f_1 + s_1 - k_1, \\ -\frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{l < x \leq l+a, y = -L} = f_1 + s_1 - k_1, \\ \frac{\partial h_1}{\partial x} \Big|_{x=\pm(l+a)} = 0 \end{array} \right. \quad (2.20)$$

де  $f_1$  – додаткове живлення ґрунтових вод (прибуткова частина балансу ґрунтових вод);  $s_1$  – кількість опадів, яка інфільтрується в ґрунтові води (прибуткова частина балансу ґрунтових вод);  $k_1$  – водовідбір з ґрунтових вод (видаткова частина балансу ґрунтових вод).

## 2.5 Методи математичного моделювання протифільтраційних завіс

Для збереження дорожнього полотна від шкідливої дії ґрунтових вод в зонах високого РГВ, що може впливати на стан насипу та верхньої будови дороги запропоновано розташування вздовж автошляху протифільтраційної завіси. Встановлення протифільтраційних завіс сприяє продовженню терміну безпечної експлуатації дороги. Розроблені методи математичного моделювання параметрів протифільтраційної завіси, що включають аналітичне розв'язання диференціальних рівнянь фільтрації із залученням комп'ютерної програми Maple. Моделювались такі параметри протифільтраційні завіси, як коефіцієнт фільтрації, прийнятий від 0,1 до 1,0 м/доб, довжина та глибина завіси. Досліджено глибину протифільтраційної завіси [61] при різних параметрах (рис. 2.4):

1. При різних коефіцієнтах фільтрації  $K_{\phi}=0,1; 0,2; 0,3$   $L_1=L_2=L_3=1$ ;  $H_1=1$ ,  $H_4=10$ .



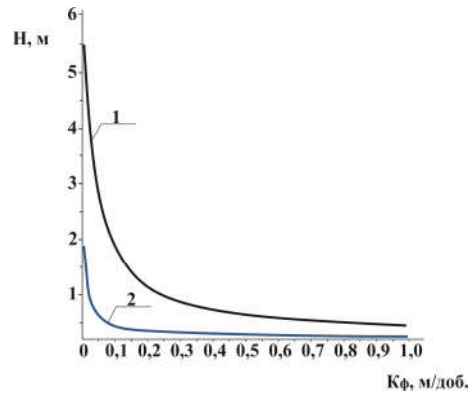
$H$  – глибина завіси, м;  $K_{\phi}$  – коефіцієнт фільтрації, м/доб

Рисунок 2.4 – Глибина протифільтраційної завіси при різних коефіцієнтах фільтрації

При  $K_{\phi} > 0,3$  м/доб, у протифільтраційної завіси значно знижується ефективність, при цьому її глибина стає несуттєвим параметром.

2. У другому варіанті розрахунків було подовжено довжину завіси до 10 м (рис. 2.5) при  $L_1=1$ ;  $L_2=0,1$ ;  $L_3=1$ ;  $H_1=10$ ;  $H_4=1$ .

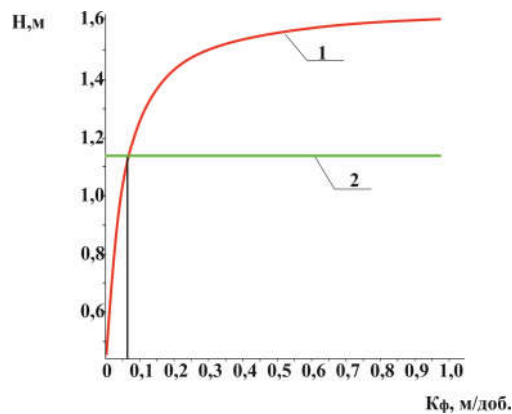




$H$  – глибина завіси, м;  $K_\phi$  – коефіцієнт фільтрації, м/доб; 1 – вихідний варіант розрахунку; 2 – подовжено довжину завіси

Рисунок 2.5 – Глибина протифільтраційної завіси при різних коефіцієнтах фільтрації та довжині

Таким чином, з рис. 2.5 видно, що, чим довша завіса, тим менше необхідно її заглиблювати. Досліджено прямопропорційну залежність глибини завіси від її довжини. На рис. 2.6 наведено графіки витрат із завісою та без неї.

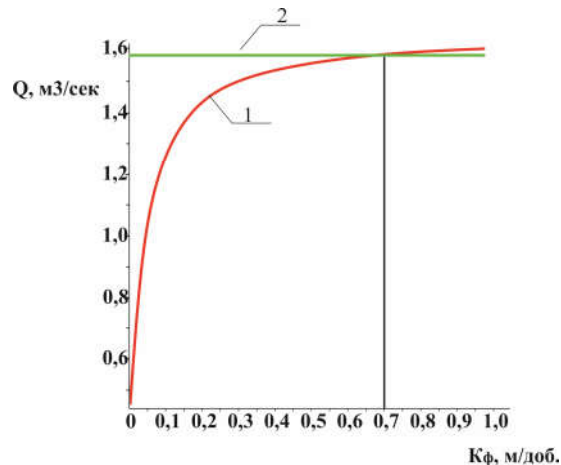


$Q$  – витрата води, м<sup>3</sup>/с;  $K_\phi$  – коефіцієнт фільтрації, м/доб; 1 – витрата води із завісою; 2 – витрата води без завіси

Рисунок 2.6 – Графік витрат із завісою та без неї

З рис. 2.6 бачимо, що завіса ефективна при  $K_\phi < 0,1$  м/доб.

На рис. 2.7 представлений випадок, коли було збільшено довжину завіси до 10 м.



$Q$  – витрата води, м<sup>3</sup>/с;  $K_{\phi}$  – коефіцієнт фільтрації, м/доб; 1 – витрата води із завісою; 2 – витрата води без завіси

Рисунок 2.7 – Графік витрат із завісою та без неї з довжиною завіси  $L=10$  м

З рис. 2.7 бачимо, що навіть з  $K_{\phi} \leq 0,7$  м/доб та подовженій довжині завіси, її використання є ефективним. З рівняння руху рідкого середовища Полубарінової-Кочіної [61], було отримано рівняння Дюпюї, яке використано для рішення стаціонарної задачі визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу. Далі було розв'язано стаціонарну задачу визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу. Встановлено, що використання протифільтраційної завіси є ефективним навіть при  $K_{\phi} \leq 0,7$  м/доб, та при більшій довжині та меншому заглибленні самої завіси [61]. Використання протифільтраційної завіси має бути у поєднанні із дренажем.

## 2.6 Висновки до другого розділу

1. Охарактеризовано об'єкт дослідження – зміна рівнів ґрунтових вод природно-техногенних геосистем великих міст (на прикладі м. Харків). Середній рівень ґрунтових вод для м. Харків дорівнює від 0,2 до 10 м, а для

значної частини території менше 2 м, що відповідає екологічно небезпечному підтопленому стану міської території. На основі характеристики об'єкту визначені фактори впливу, що спричиняють стійке підвищення рівнів ґрунтових вод забудованих територій України [14, 20].

2. Експерименти з визначення зміни РГВ забудованих територій, що проводились в спеціально обладнаних і пристосованих для цього свердловинах, проведені згідно методів дослідження екологічно небезпечної дії ГВ. Згідно отриманих експериментальних даних розроблено методику оптимізації статей водного балансу ГВ, за якою знижуються втрати води в 2,4 рази та підвищується водовідбір в 15 разів, на що необхідно витратити 48000 грн/доб для відкачки води насосними агрегатами [24].

3. Результати математичного моделювання дозволяють використовувати такі параметри завіси, що характеризуються коефіцієнтом фільтрації  $K_{\phi} \leq 0,7$  м/доб, та при більшій довжині та меншому заглибленні самої завіси [61].

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД ЗАБУДОВАНОЇ ТЕРИТОРІЇ НА ПРИКЛАДІ М. ХАРКІВ ТА ЇХ ЕКОЛОГІЧНО ЗНАЧИМИ НАСЛІДКИ

Для визначення реальної ситуації щодо положення та змін РҐВ в м. Харків, автором були виконані вимірювання РҐВ та розраховані коефіцієнти кореляції, які показали лінійну залежність змін РҐВ від кількості опадів. Коефіцієнт кореляції набуває значень від  $-1$  до  $1$ . Значення  $+1$  означає, що залежність між РҐВ та кількістю опадів є лінійною. Якщо коефіцієнт кореляції Пірсона дорівнює від  $0$  до  $-1$ , то саме лінійної кореляції між змінними немає.

Автор брала участь в якості робочого спостерігача Геологічної партії в роботі з 3–ма режимними водопунктами м. Харків [85]. Вимірювання РҐВ в спеціально обладнаних і пристосованих для цього свердловинах проводились за допомогою рівнеміра ГРУ–100 з періодичністю 1 раз на місяць протягом 2004–2017 рр.

Теоретичний аналіз отриманих даних сприяв розумінню загальної ситуації з розвитком підтоплення міської території, виявленням локальних факторів впливу на зміну РҐВ.

Розташування постів спостережень за РҐВ надано на рис. 3.1.

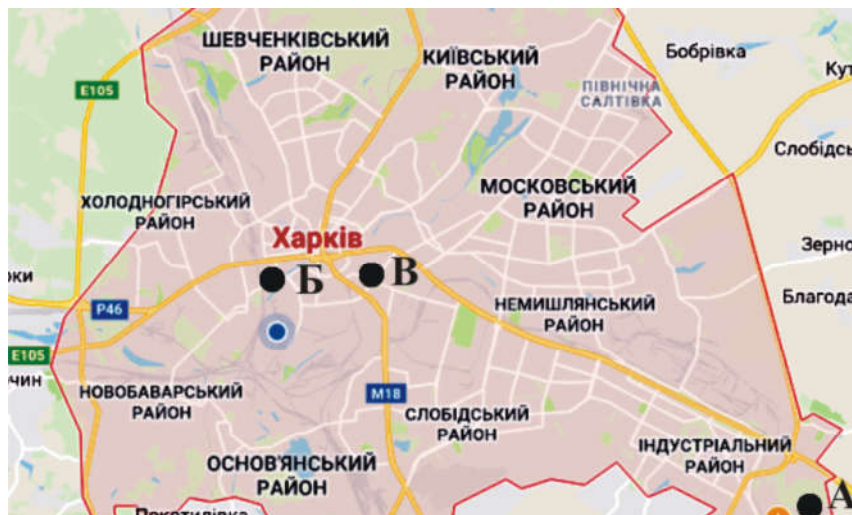


Рисунок 3.1 – Розташування постів спостережень за РГВ

Точки А, Б, В – три режимних водопункти м. Харків, в яких проводились вимірювання РГВ, знаходяться посеред приватного сектору, де більша частина території незабудована та озеленена, що сприяє інтенсифікації процесу евапотранспірації.

### 3.1 Дослідження зміни рівня ґрунтових вод в точці А

Дані щодо зміни РГВ в свердловині за період з 2009 по 2017 рр. наведені на рис. 3.2 – 3.10.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2009 р. зображено на рис. 3.2.

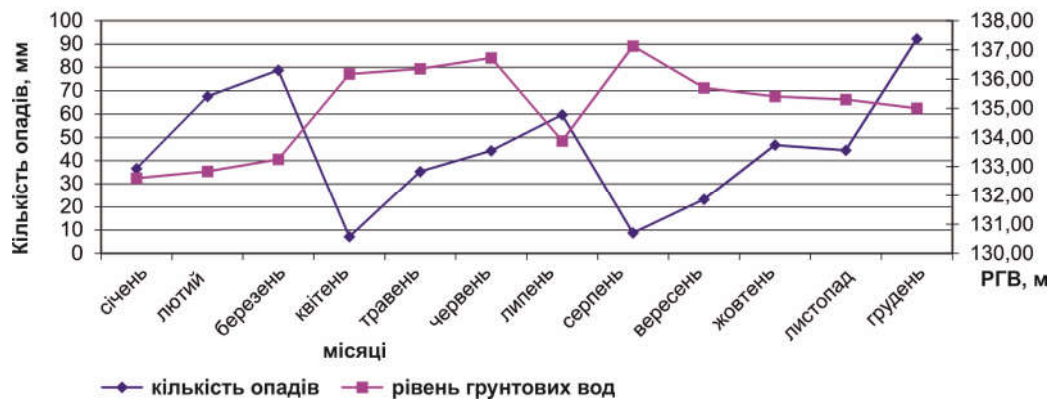


Рисунок 3.2 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2009 р.

Простежується зміна РГВ з амплітудою коливань 5 см (рис. 3.2). Спостерігається відносно сталий режим рівнів ґрунтових вод. Коефіцієнт кореляції становить – 0,576, що означає позитивну кореляцію РГВ зі зміною атмосферних опадів. Ріст РГВ з березня по червень пояснюється процесом сніготанення.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2010 р. зображено на рис. 3.3.

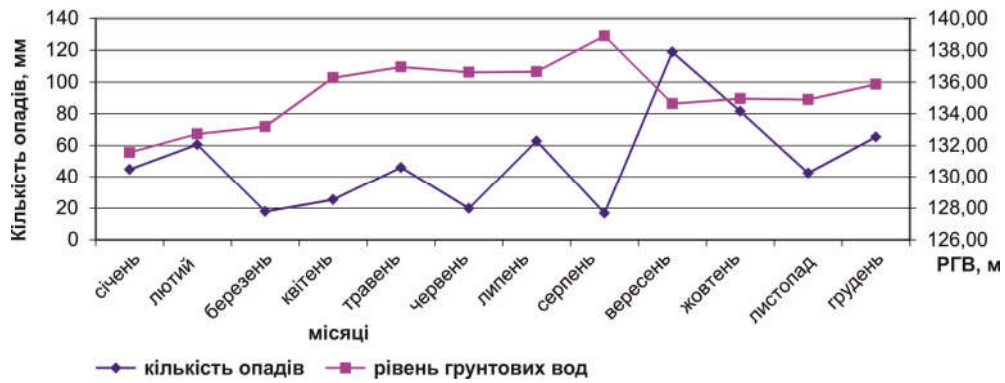


Рисунок 3.3 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2010 р.

Простежується зміна РГВ з амплітудою коливань 8 см (рис. 3.3). Спостерігається відносно сталий режим рівнів ґрунтових вод. Коефіцієнт кореляції становить – 0,230, що означає відсутність кореляції РГВ зі зміною атмосферних опадів за рік.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2011 р. зображено на рис. 3.4.

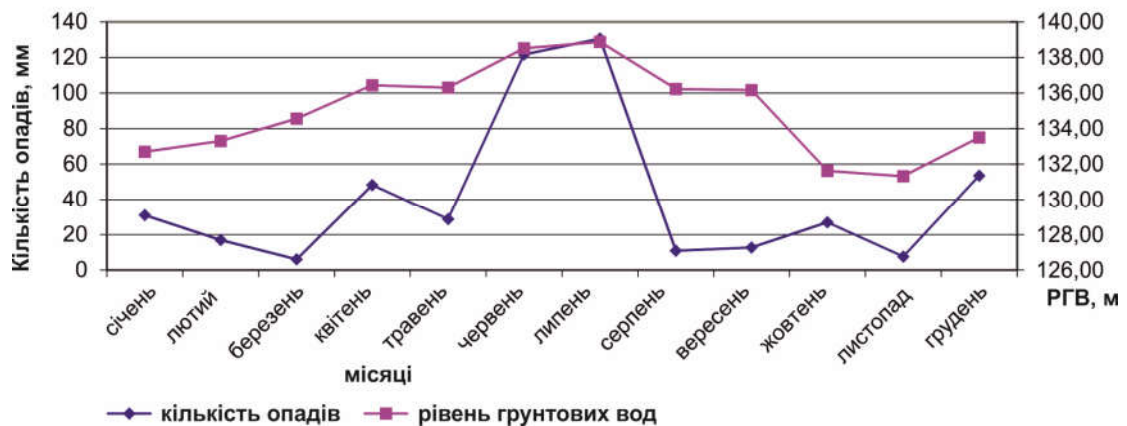


Рисунок 3.4 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2011 р.

На рис. 3.4 бачимо, що незалежно від підвищення кількості опадів в літній період, РГВ знизився. Це пояснюється інтенсивною дією випаровування в літній період. Коефіцієнт кореляції становить 0,670, що означає позитивну кореляцію РГВ зі зміною атмосферних опадів за рік.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2012 р. зображено на рис. 3.5.

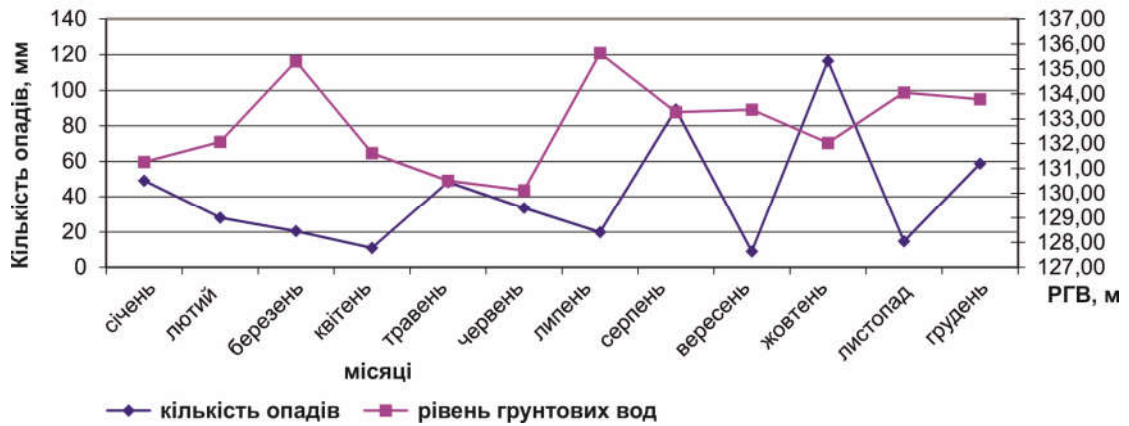


Рисунок 3.5 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2012 р.

Простежується зміна РГВ з амплітудою коливань 6 см (рис. 3.5). Спостерігається відносно сталий режим рівнів ґрунтових вод. Коефіцієнт кореляції становить  $-0,223$ , що означає відсутність кореляції РГВ зі зміною атмосферних опадів за рік.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2013 р. зображено на рис. 3.6.

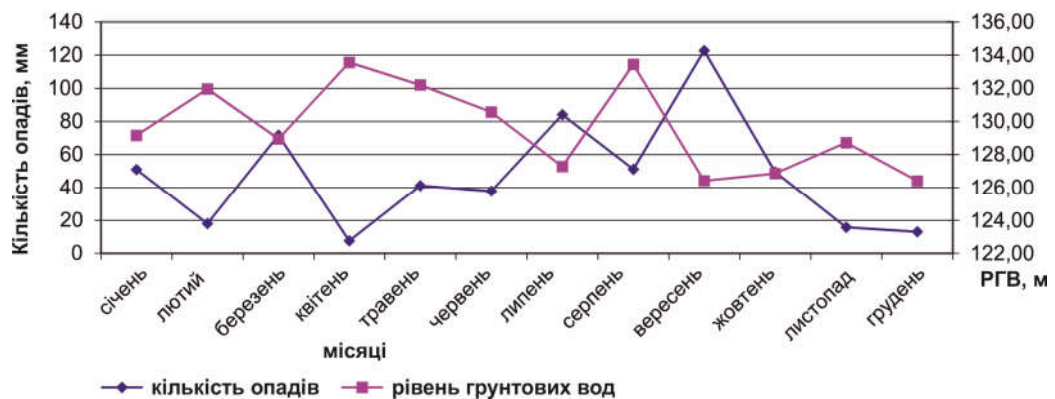


Рисунок 3.6 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2013 р.

Період підвищення РГВ (рис. 3.6) з березня по квітень при зниженні кількості опадів пояснюється інтенсивним сніготаненням весняного періоду. Коефіцієнт кореляції становить  $-0,455$ , що означає відсутність кореляції РГВ зі зміною атмосферних опадів за рік.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2014 р. зображено на рис. 3.7.

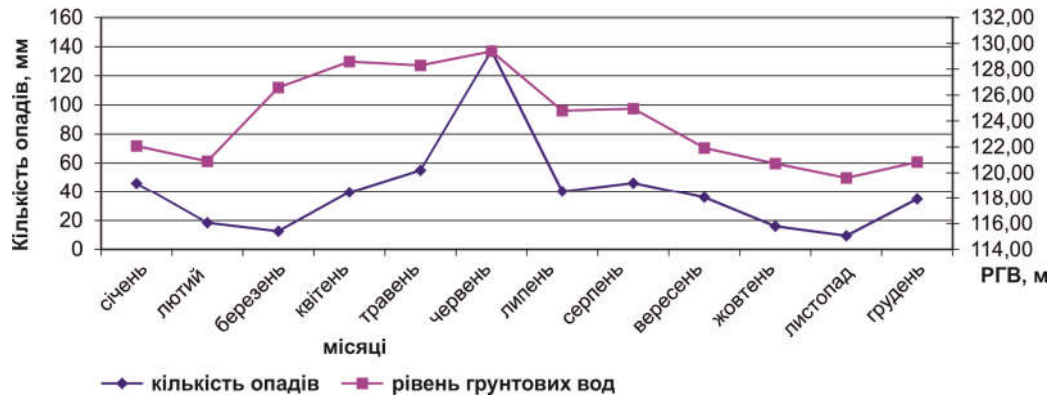


Рисунок 3.7 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2014 р.

Період підвищення РГВ (рис. 3.7) з лютого по квітень при зниженні кількості опадів пояснюється інтенсивним сніготаненням зимово-весняного періоду. Коефіцієнт кореляції становить  $0,629$ , що означає позитивну кореляцію РГВ зі зміною атмосферних опадів за рік.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2015 р. зображено на рис. 3.8.

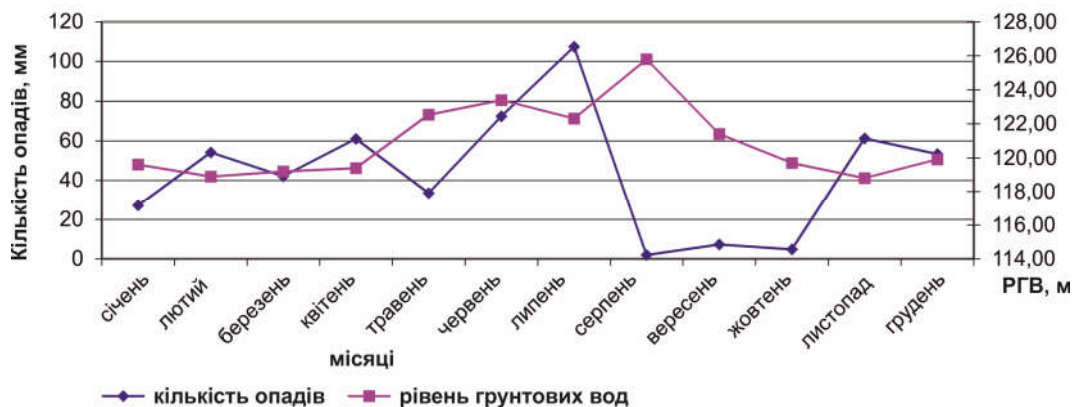




Рисунок 3.8 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2015 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.8) не корелює зі зміною атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить  $-0,134$ .

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2016 р. зображено на рис. 3.9.

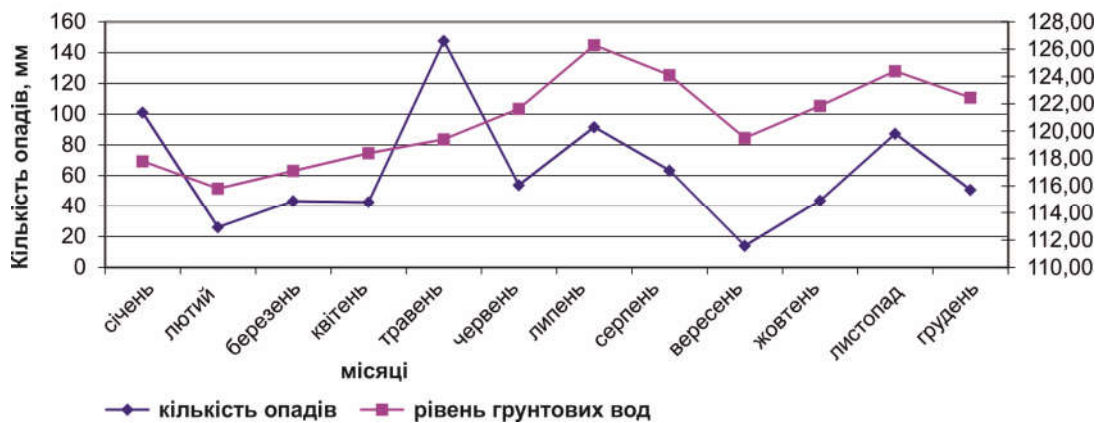


Рисунок 3.9 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2016 р.

Простежується зміна РГВ з амплітудою коливань 10 см (рис. 3.9). Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить  $0,253$ .

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2017 р. зображено на рис. 3.10.

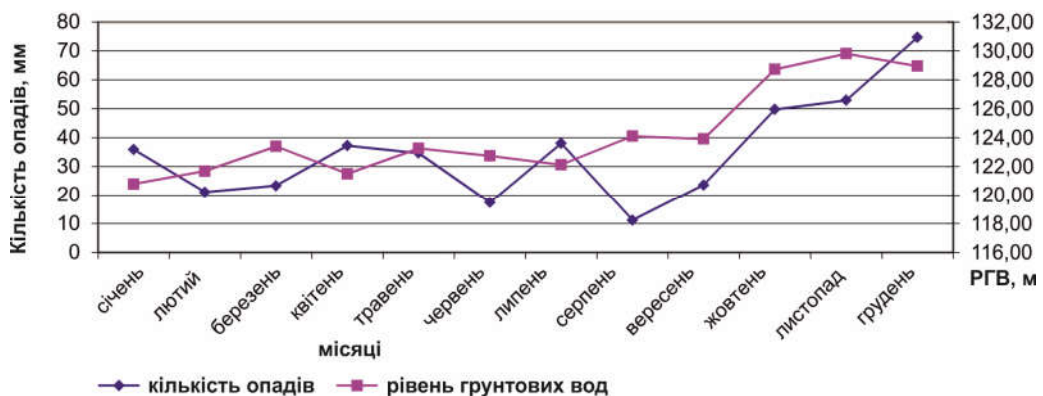


Рисунок 3.10 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» у 2017 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.10) позитивно корелює зі зміною атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить 0,682.

Узагальнена картина зміни РГВ в свердловині ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» з 2009 р. по 2017р. (рис. 3.11).

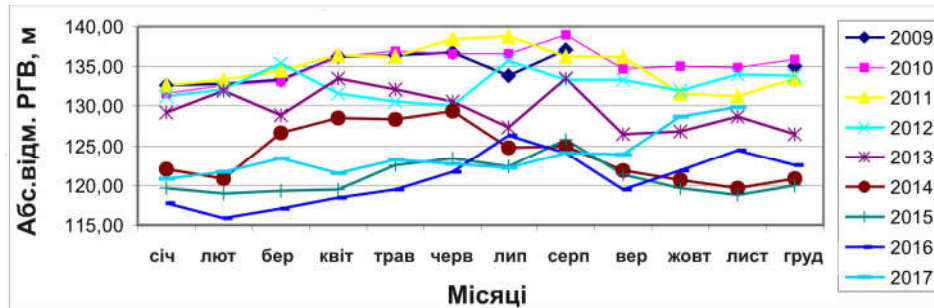


Рисунок 3.11 – Зміна РГВ в свердловині ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» з 2009р. по 2017 р. РГВ показаний в абсолютних відмітках.

Нижче, на рис. 3.12 наведено зіставлення середніх значень абсолютних відміток РГВ і кількості опадів, що випали за кожен рік в період з 2009 р. по 2017 р.

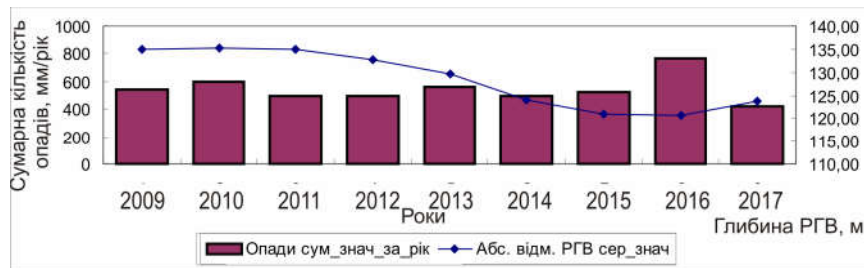


Рисунок 3.12 – Порівняння річних сумарних значень кількості опадів та середніх значень абсолютних відміток в свердловині ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» в період з 2009 р. по 2017 р.

За даними досліджень, з'ясовано, що в свердловині ТОВ «САН ІНБЕВ Україна» РГВ позитивно корелює зі зміною кількості атмосферних опадів у 2009, 2011, 2014, та 2017 роках.

### 3.2 Дослідження зміни рівня ґрунтових вод в точці Б

Вимірювання глибини залягання рівня ґрунтових вод в даній свердловині проводилися щомісяця в період з 2004 р по 2017 р. (рис. 3.13). Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2004 р. зображено на рис. 3.13.

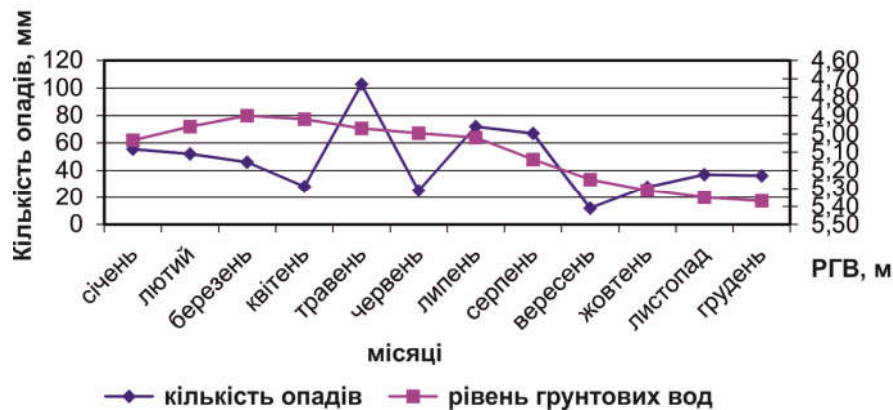


Рисунок 3.13 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2004 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.13) поступово знижується починаючи з квітня по грудень. Інтенсивний період зниження РГВ спостерігається з липня по вересень, що зумовлено випаровуванням у літній період. А зниження РГВ в осінній період зумовлене зниженням кількості опадів. Коефіцієнт кореляції становить 0,387, що означає відсутність кореляції РГВ зі зміною атмосферних опадів за рік. Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2005 р. зображено на рис. 3.14.

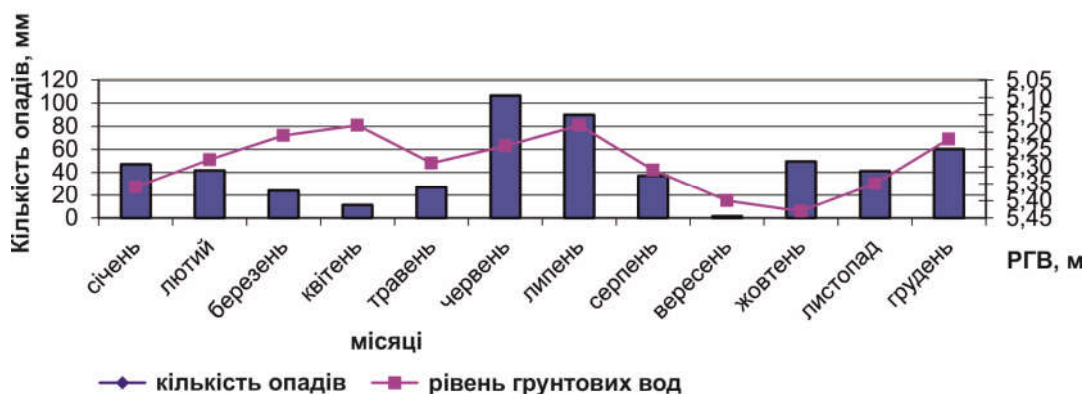


Рисунок 3.14 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2005 р.

Підвищення рівня ґрунтових вод на 15–25 см (рис. 3.14) на фоні зниження кількості опадів на ділянці на вул. Конторській у 2005 р. може мати техногенну природу – наприклад, може бути викликано втратами води з підземних комунікацій. Коефіцієнт кореляції становить 0,289, що означає відсутність кореляції РГВ зі зміною атмосферних опадів впродовж року.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2006 р. зображено на рис. 3.15.

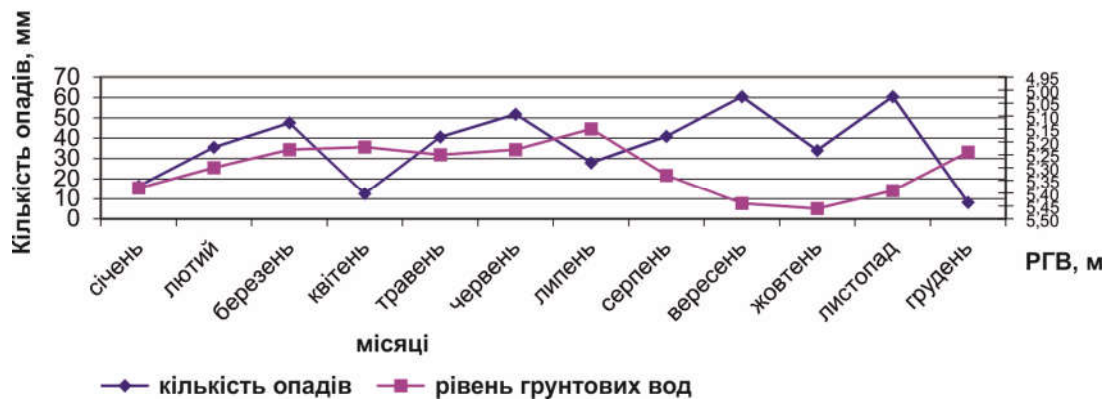


Рисунок 3.15 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2006 р.

Інтенсивний період зниження РГВ (рис. 3.15) спостерігається з липня по вересень, що зумовлено випаровуванням у літній період. Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить – 0,342.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2007 р. зображено на рис. 3.16.

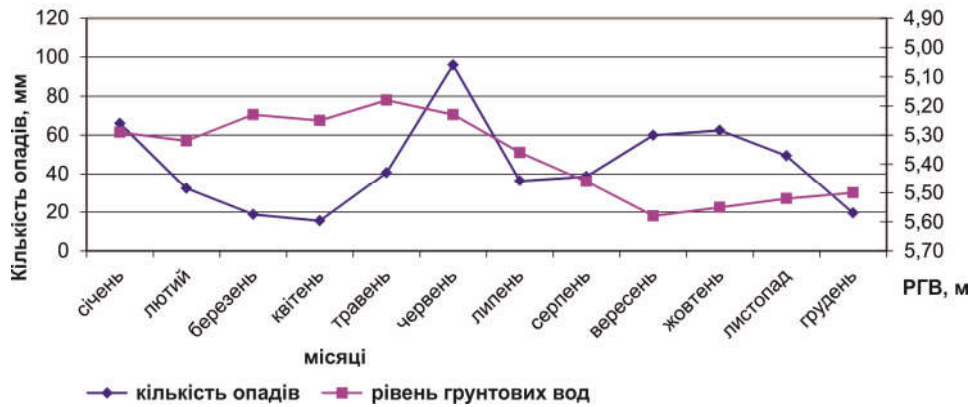


Рисунок 3.16 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2007 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.16) не корелює зі зміною атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить  $-0,081$ .

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2008 р. зображено на рис. 3.17.

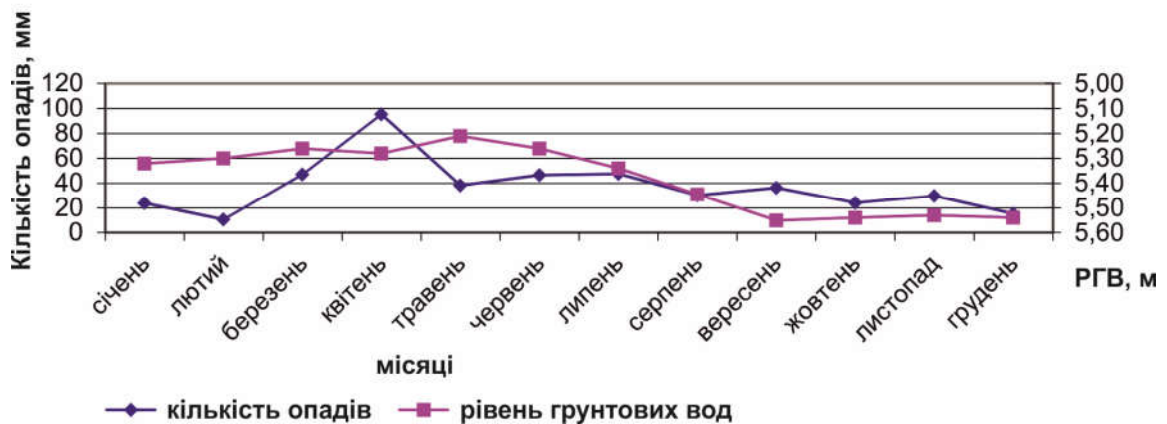


Рисунок 3.17 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2008 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.17) не корелює зі зміною атмосферних опадів за рік. Коефіцієнт кореляції складає  $0,418$ .

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2009 р. зображено на рис. 3.18.

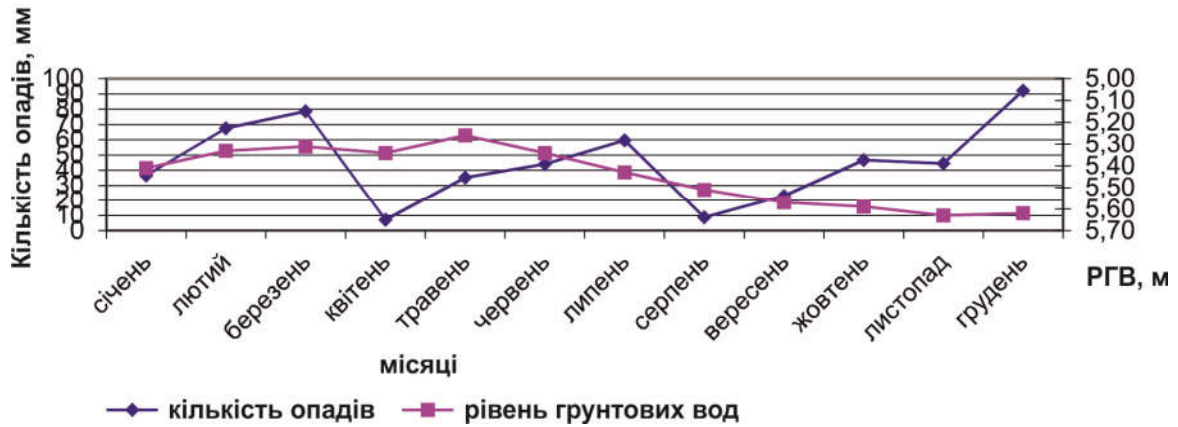


Рисунок 3.18 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2009 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.18) поступово знижується з травня по грудень незалежно від зміни кількості опадів, що пояснюється дією евапотранспірації. Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить  $-0,055$ .

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2010 р. зображено на рис. 3.19.

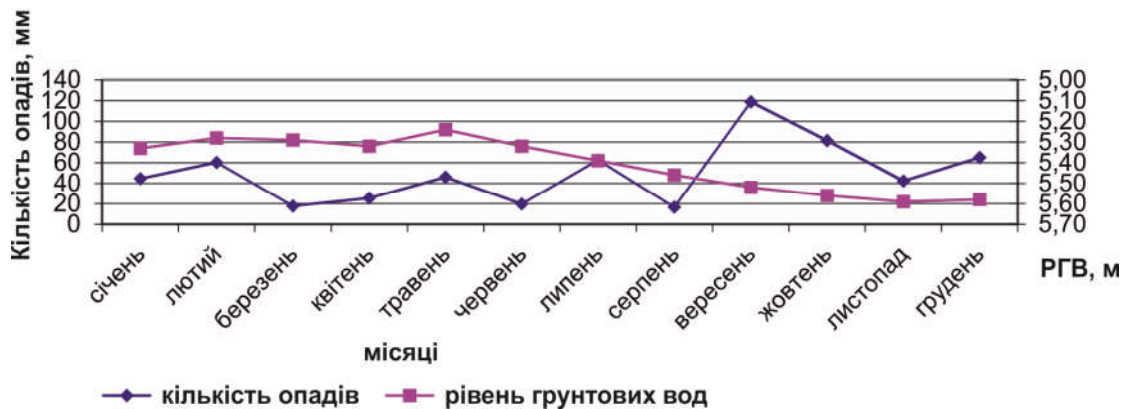


Рисунок 3.19 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2010 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.19) поступово знижується незалежно від зміни кількості опадів, що пояснюється дією евапотранспірації. Рівень

грунтових вод не корелює зі зміною атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить  $-0,474$ .

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2011 р. зображено на рис. 3.20.

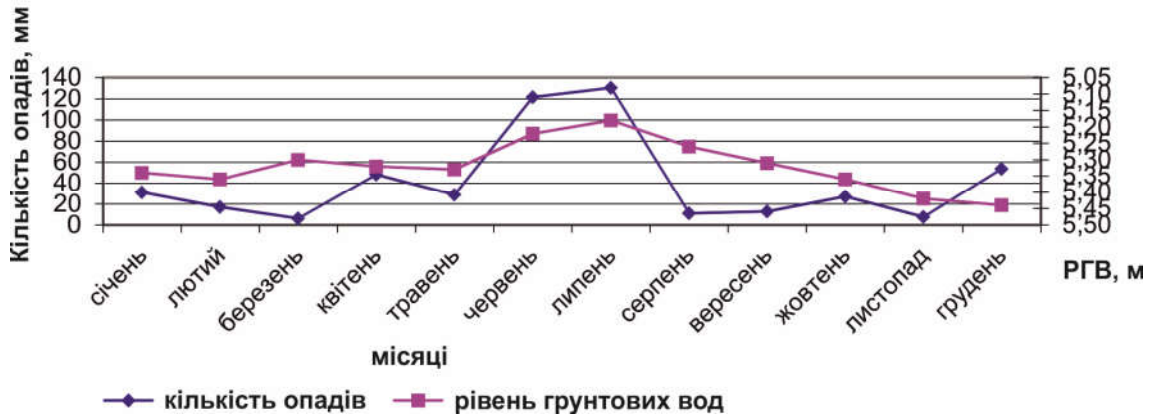


Рисунок 3.20 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2011 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.20) позитивно корелює зі зміною атмосферних опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає  $0,614$ .

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2012 р. зображено на рис. 3.21.

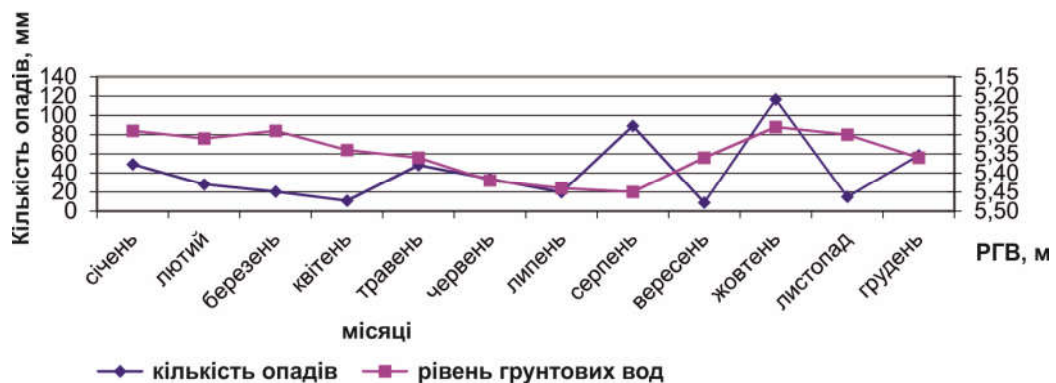


Рисунок 3.21 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2012 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.21) не корелює зі зміною атмосферних опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає  $0,004$ .

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2013 р. зображено на рис. 3.22.

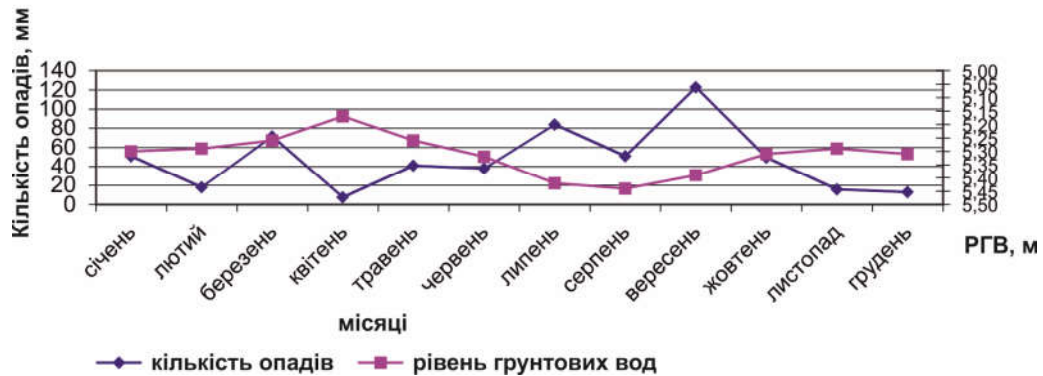


Рисунок 3.22 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2013 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.22) позитивно корелює зі зміною кількості атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить – 0,594.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2014 р. зображено на рис. 3.23.

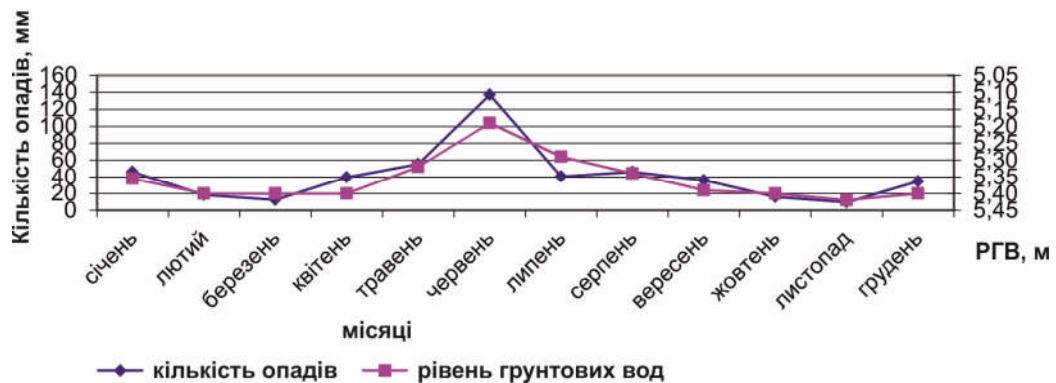


Рисунок 3.23 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2014 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.23) повністю корелює зі зміною кількості атмосферних опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,911.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2015 р. зображено на рис. 3.24.



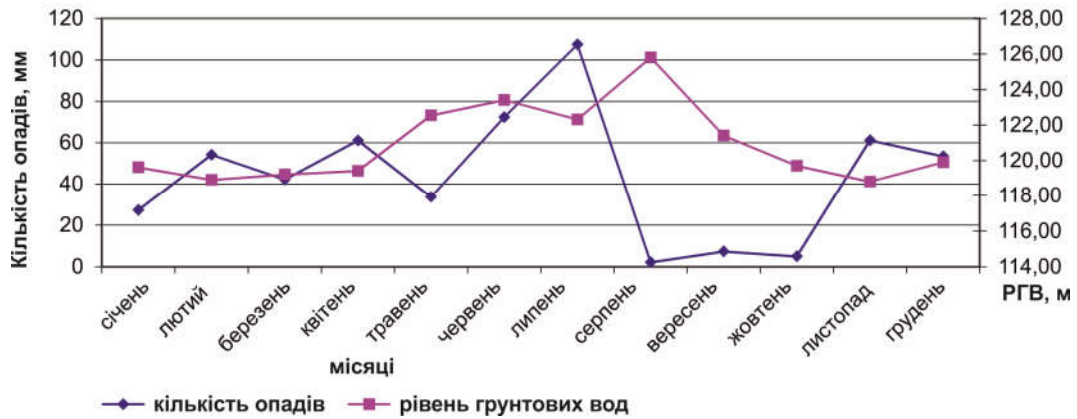


Рисунок 3.24 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2015 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.24) не корелює зі зміною атмосферних опадів протягом року. Спостерігається незначна амплітуда коливання РГВ в межах 6 см. Коефіцієнт кореляції складає 0,359.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2016 р. зображено на рис. 3.25.

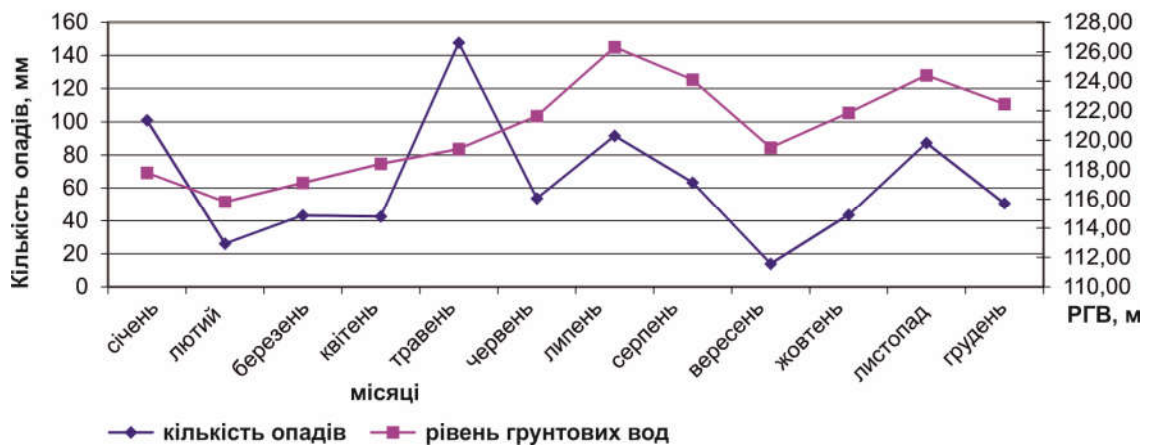


Рисунок 3.25 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2016 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.25) не корелює зі зміною атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить – 0,039. Спостерігається незначна амплітуда коливання РГВ в межах 7 см.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Конторській у 2017 р. зображено на рис. 3.26.

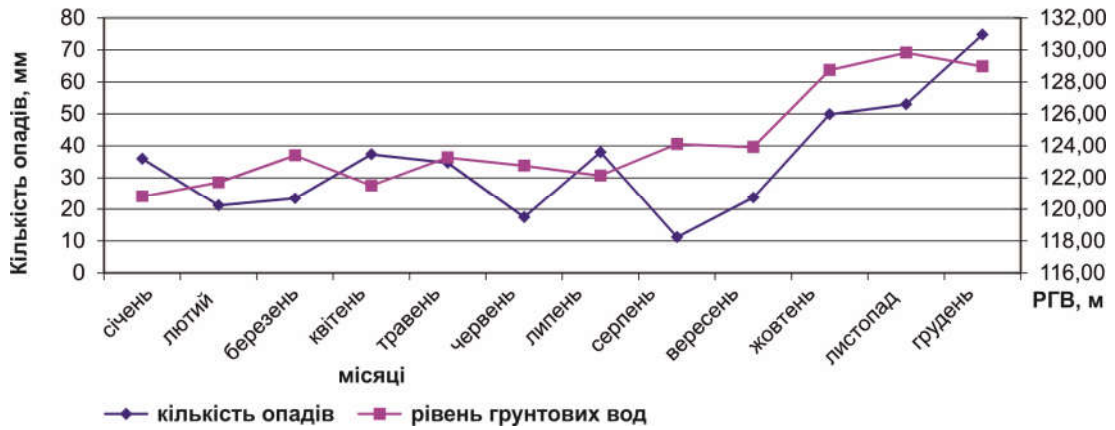


Рисунок 3.26 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Конторській у 2017 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.26) не корелює зі зміною атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить  $-0,440$ .

Узагальнена картина зміни РГВ в свердловині на вул. Конторській з 2004 р. по 2017 р. (рис. 3.27).

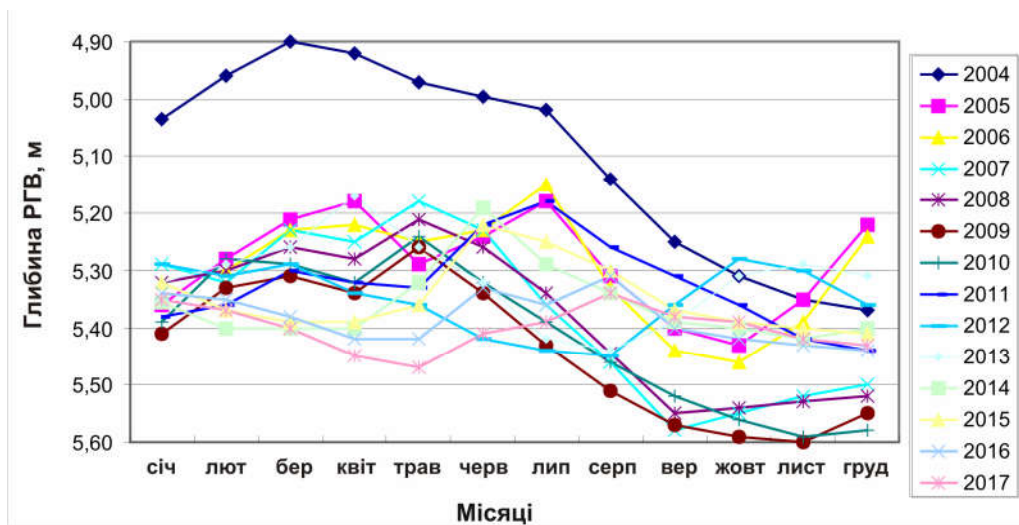


Рисунок 3.27 – Зміна РГВ в свердловині на вул. Конторській з 2004 р. по 2017р.

Нижче, на рис. 3.28 наведена зміна РГВ в свердловині на вул. Конторській з 2004 р. по 2017 р.

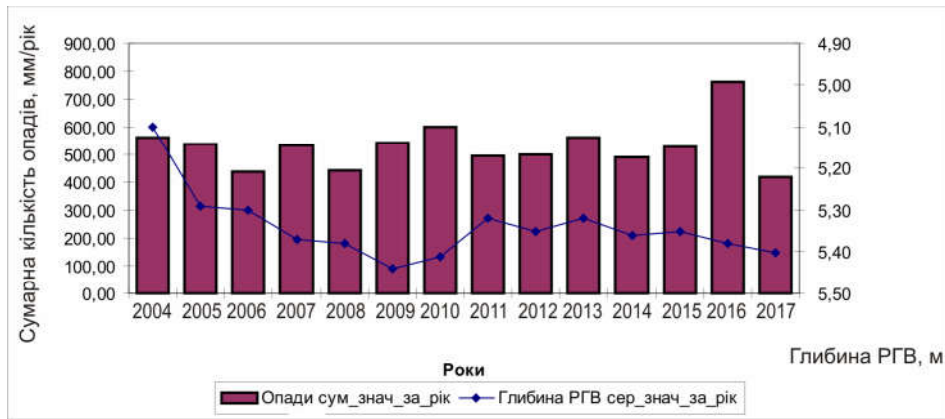


Рисунок 3.28 – Порівняння річних сумарних значень кількості опадів та середньорічної глибини залягання РГВ в свердловині на вул. Конторській в період з 2004 р. по 2017 р.

В свердловині на вул. Конторська в період 2004–2009 рр. простежується зниження РГВ на 35 см, а в період 2009–2014 рр. підвищення – на 10 см. При цьому середньорічна кількість опадів залишалася стабільною. Це може вказувати на вплив техногенних факторів. У той же час внутрішньорічні (сезонні) амплітуди коливання рівнів були значно більшими. Їх характер з мінімальними глибинами рівнів з березня по травень однозначно вказує на природний фактор – підвищене живлення ґрунтових вод в період сніготанення. Посушливий період з серпня по жовтень зумовив максимальні глибини РГВ в цей час. РГВ корелює зі зміною кількості опадів у 2011, 2013 та 2014 роках.

### 3.3 Дослідження зміни рівня ґрунтових вод в точці В

Вимірювання глибини залягання рівня ґрунтових вод в даній свердловині проходили щомісяця в період з 2004 р. по 2017 р. Результати наведені на рис. 3.29 – 3.44.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2004 р. зображено на рис. 3.29.

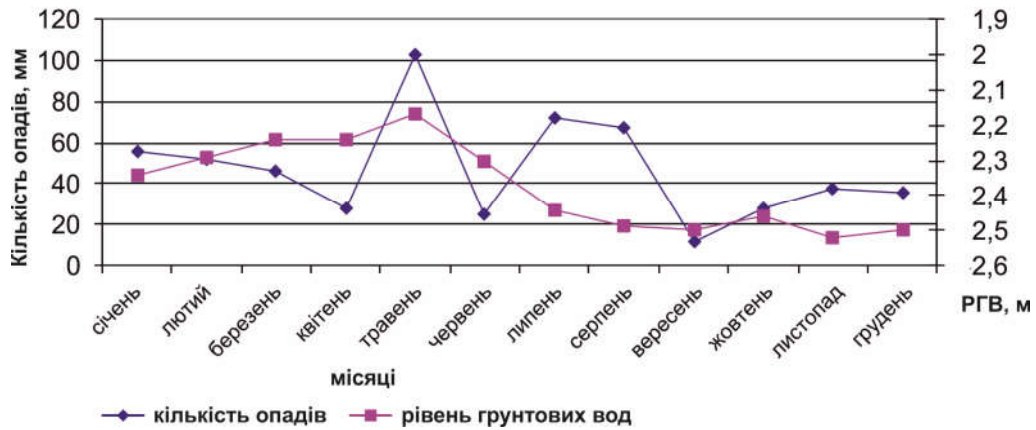


Рисунок 3.29 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2004 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.29) з січня по травень підіймається на 30 см за рахунок масового танення снігу в зимово-весняний період. А зниження РГВ починаючи з травня, зумовлено випаровуванням в теплий період року. Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною кількості атмосферних опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,378.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2005 р. зображено на рис. 3.30.

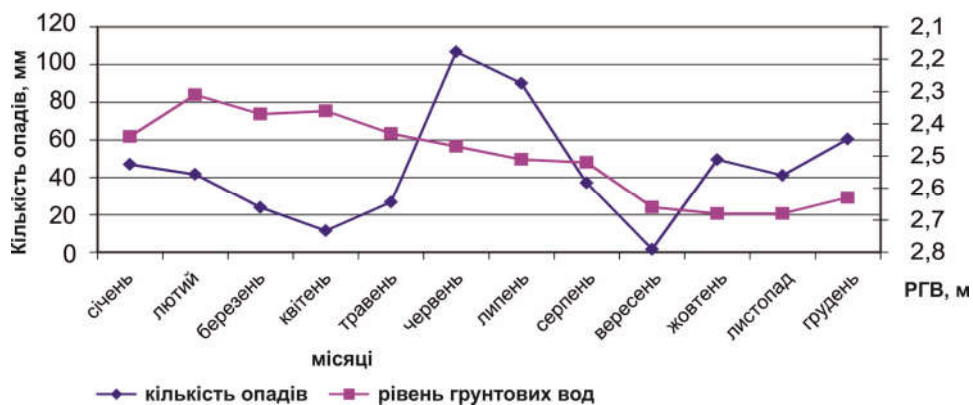


Рисунок 3.30 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2005 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.30) знижується починаючи з квітня, що зумовлено посиленням дії евапотранспірації в теплий період року та

наближенням РГВ до поверхні. Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить – 0,066.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2006 р. зображено на рис. 3.31.

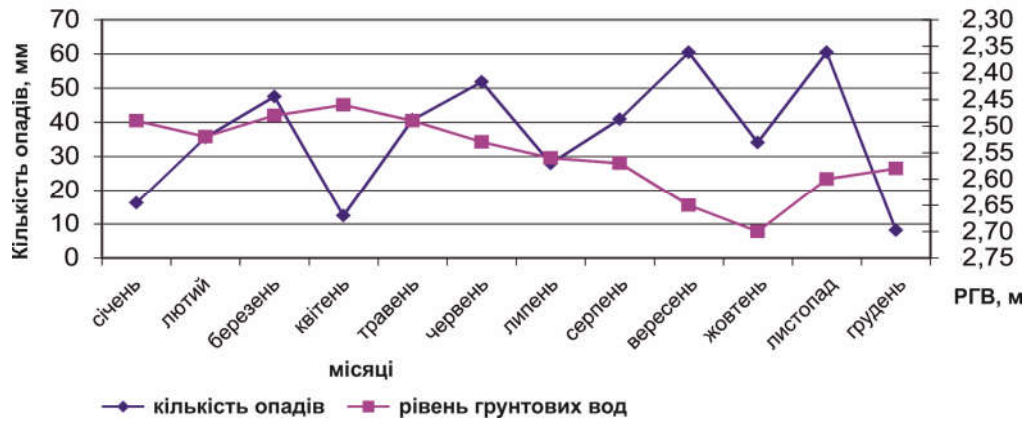


Рисунок 3.31 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2006 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.31) знижується починаючи з квітня, що зумовлено посиленням дії евапотранспірації в теплий період року та наближенням РГВ до поверхні. Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною кількості атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить – 0,318.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2007 р. зображено на рис. 3.32.

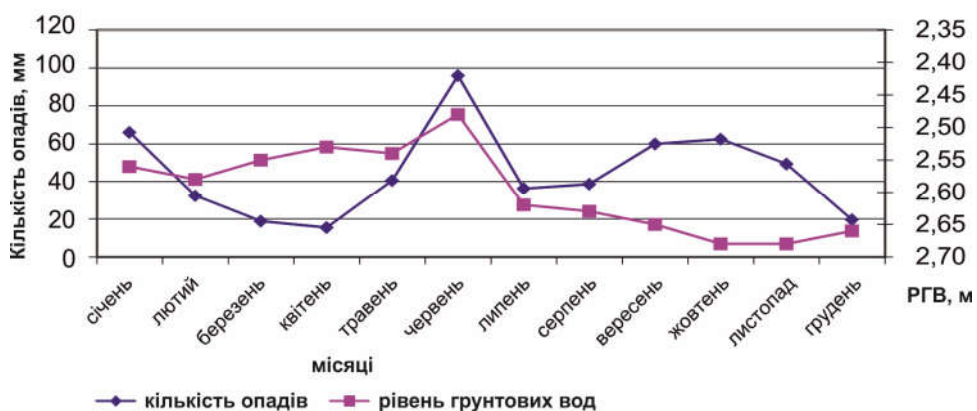


Рисунок 3.32 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2007 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.32) знижується починаючи з червня, що зумовлено посиленням дії евапотранспірації в теплий період року та наближенням РГВ до поверхні. В зимово-весняний період РГВ підвищувався під впливом масового танення снігу. Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною кількості атмосферних опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,146.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2008 р. зображено на рис. 3.33.

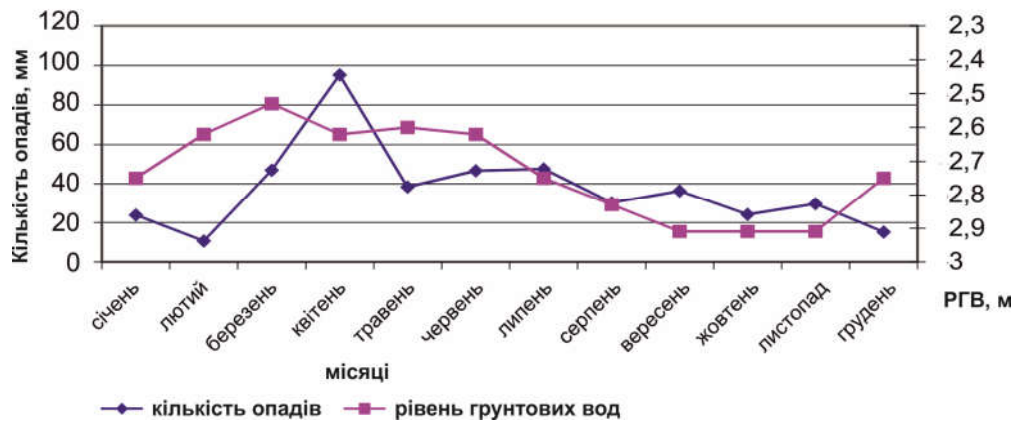


Рисунок 3.33 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2008 р.

Не зважаючи на значну кількість опадів (рис. 3.33) в період з лютого по квітень, РГВ, що знаходиться близько від поверхні, був стабілізований дією евапотранспірації та знижувався. Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною кількості атмосферних опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,357.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2009 р. зображено на рис. 3.34.

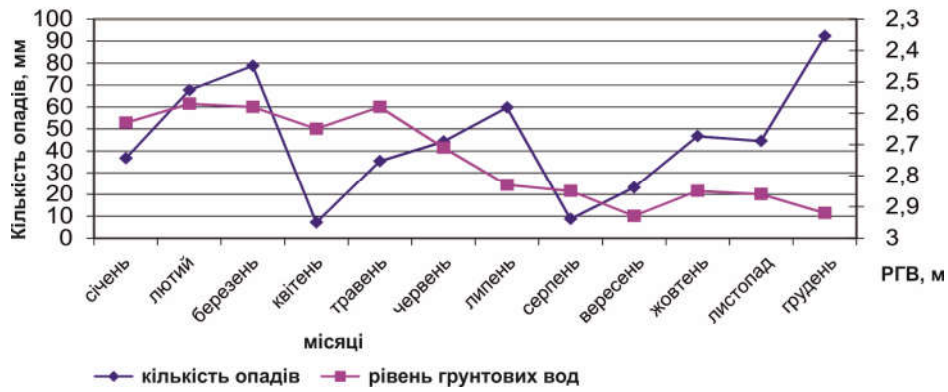


Рисунок 3.34 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2009 р.

Не зважаючи на значну кількість опадів (рис. 3.34) протягом року, РГВ, що знаходиться близько від поверхні, був стабілізований дією евапотранспірації та знижувався. Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною кількості атмосферних опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,039.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2010 р. зображено на рис. 3.35.



Рисунок 3.35 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2010 р.

Рівень ґрунтових вод (рис.3.35) позитивно корелює зі змінами кількості опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,717.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2011 р. зображено на рис. 3.36.

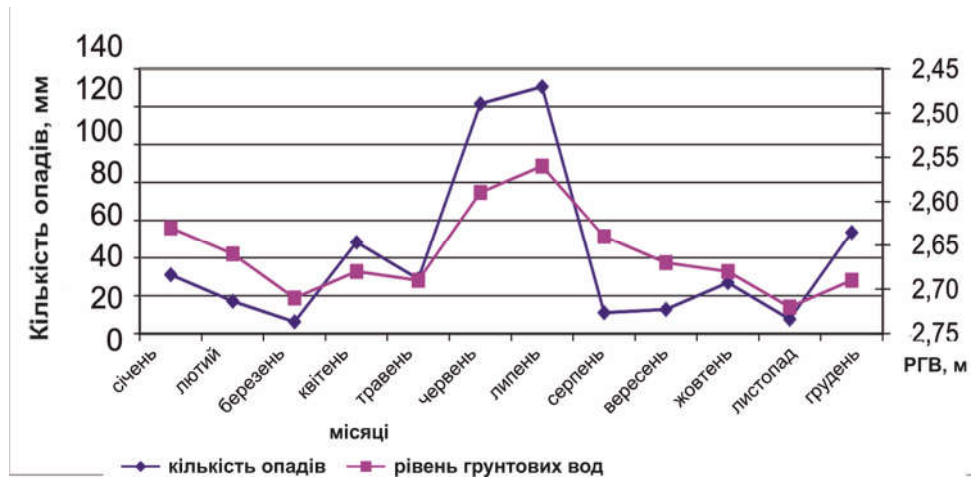


Рисунок 3.36 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2011 р.

Рівень ґрунтових вод (рис.3.36) повністю корелює зі змінами кількості опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,803.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2012 р. зображено на рис. 3.37.

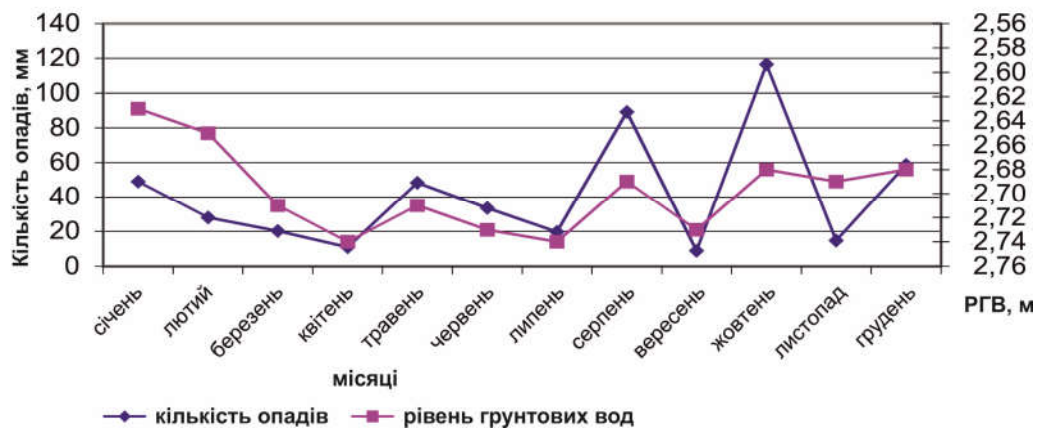


Рисунок 3.37 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2012 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.37) стабілізується від посилення дії евапотранспірації в теплий період року та наближенням РГВ до поверхні.



Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною кількості атмосферних опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,416.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2013 р. зображено на рис. 3.38.

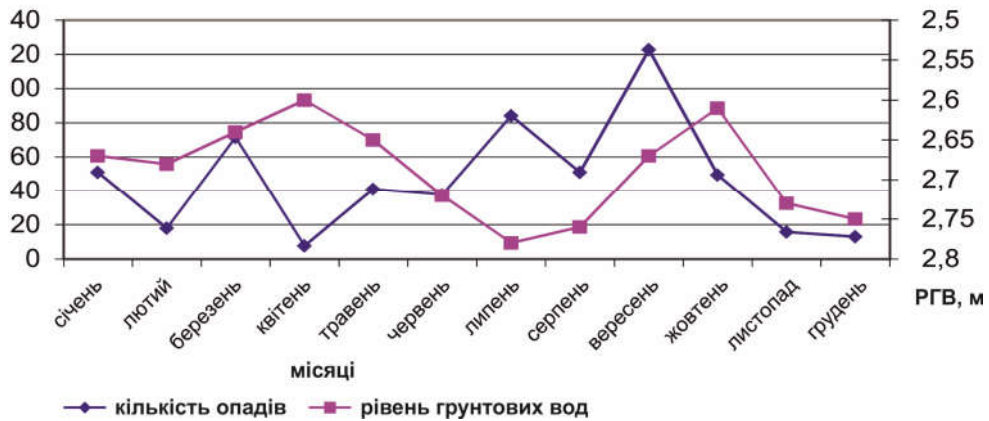


Рисунок 3.38 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2013 р.

Рівень ґрунтових вод (рис.3.38) не корелює зі зміною кількості атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить – 0,050.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2014 р. зображено на рис. 3.39.

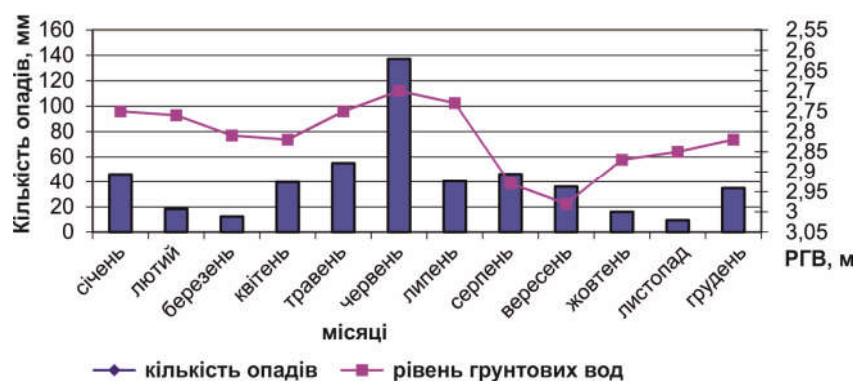


Рисунок 3.39 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2014 р.

Підвищення рівня ґрунтових вод на 15–20 см (Рисунки ) на фоні зниження кількості опадів на ділянці на вул. Невського у 2014 р. може мати

техногенну природу – наприклад, може бути викликано з втратами води з підземних комунікацій. Рівень ґрунтових вод не корелює зі зміною кількості атмосферних опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,438.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2015 р. зображено на рис. 3.40.

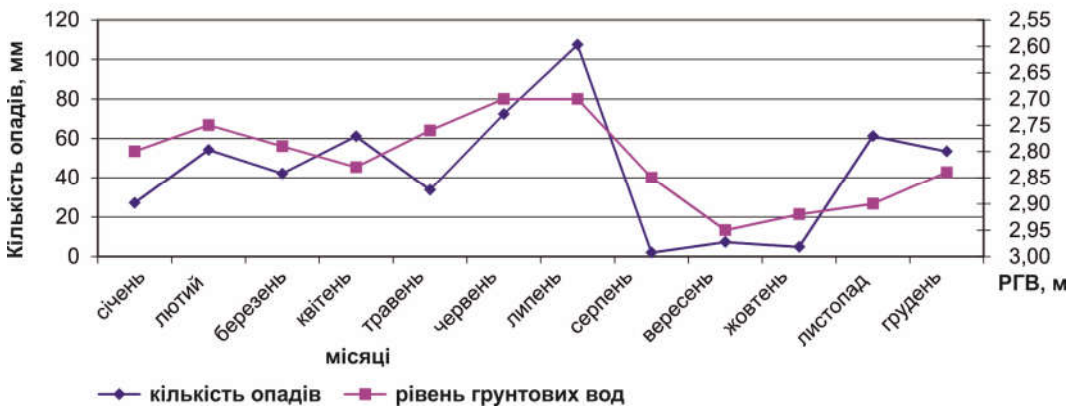


Рисунок 3.40 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2015 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.39) знижується з липня по грудень на 25см поряд із зміною кількості опадів та дією евапотранспірації. Рівень ґрунтових вод позитивно корелює зі зміною кількості опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,678.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2016 р. зображено на рис. 3.41.

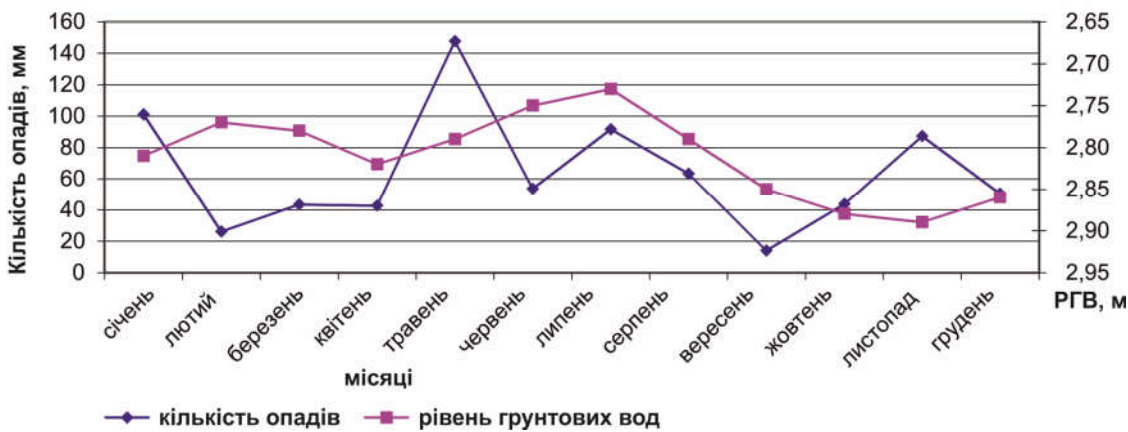


Рисунок 3.41 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2016 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.41) не корелює зі зміною кількості опадів протягом року. Коефіцієнт кореляції складає 0,170.

Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та абсолютних відміток РГВ на вул. Невського у 2017 р. зображено на рис. 3.42.

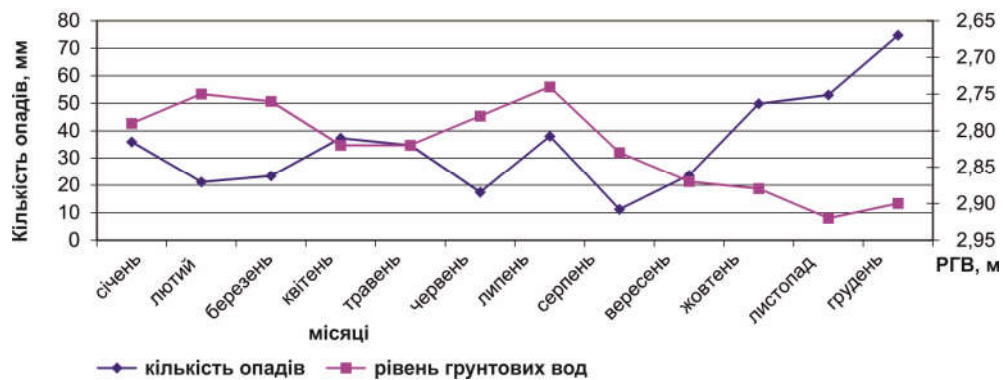


Рисунок 3.42 – Порівняння середньомісячних значень кількості опадів та глибини залягання РГВ на вул. Невського у 2017 р.

Рівень ґрунтових вод (рис. 3.42) позитивно корелює зі зміною кількості атмосферних опадів за рік, коефіцієнт кореляції становить – 0,608. З липня по вересень інтенсивна дія евапотранспірації теплого періоду року зумовлює зниження РГВ на 15 см. Опали холодного періоду року на РГВ не впливали.

Узагальнена картина зміни РГВ в свердловині на вул. О. Невського з 2004 р. по 2017 р. (рис. 3.43).

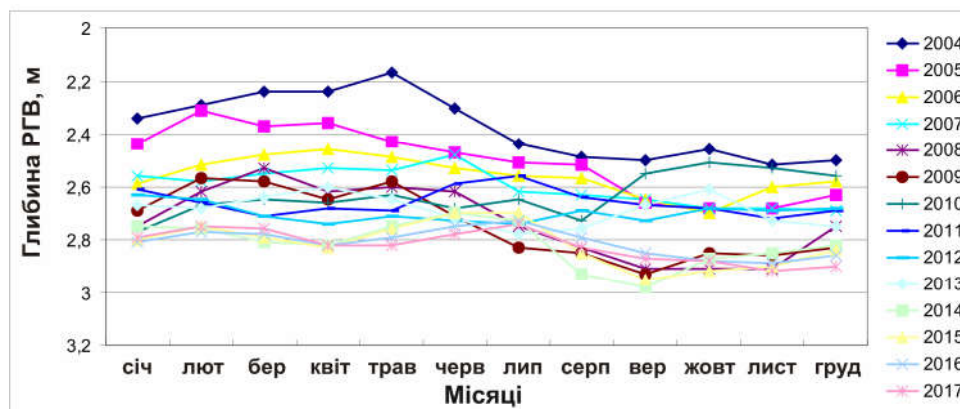


Рисунок 3.43 – Зміна РГВ в свердловині на вул. О. Невського з 2004 р. по 2017 р.

На рис 3.44. наведено зіставлення середніх значень РГВ і кількості опадів, що випали за кожен рік в період з 2004 р. по 2017 р.

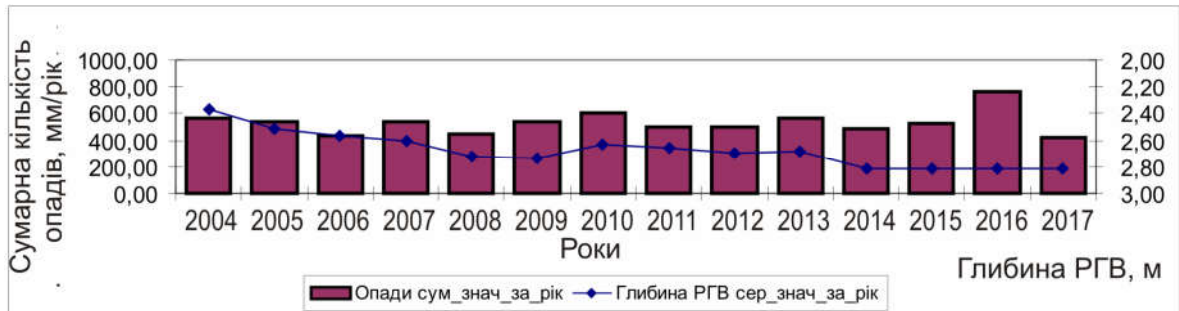


Рисунок 3.44. – Порівняння річних сумарних значень кількості опадів та середньорічної глибини залягання РГВ в свердловині на вул. О. Невського в період з 2004 р. по 2017 р.

В свердловині на вул. О. Невського в період з 2004 по 2009 рр. РГВ знизився на 40 см, в 2009-2014 роках рівень не суттєво підвищувався, а в період з 2014 по 2017 рр. РГВ був стабілізований. РГВ позитивно корелює зі зміною кількості опадів у 2010, 2011, 2015 та 2017 роках.

Статистична обробка даних вимірювань зміни глибини РГВ виконана методом варіаційної статистики, результати представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Стандартне відхилення і коефіцієнт варіації по кожному ряду спостережень за РГВ

Назва точки, рік	Середнє значення РГВ або Абс.відм.	Станд. Відхил.	Коеф. вар, %
РГВ Конторська 2004	5,10	0,174	3
РГВ Конторська 2005	5,29	0,085	2
РГВ Конторська 2006	5,30	0,095	2
РГВ Конторська 2007	5,37	0,142	3
РГВ Конторська 2008	5,38	0,128	2
РГВ Конторська 2009	5,44	0,122	2
РГВ Конторська 2010	5,41	0,126	2
РГВ Конторська 2011	5,32	0,077	1
РГВ Конторська 2012	5,35	0,06	1
РГВ Конторська 2013	5,32	0,074	1

РГВ Конторська 2014	5,36	0,066	1
РГВ Конторська 2015	5,35	0,062	1
РГВ Конторська 2016	5,38	0,044	1
РГВ Конторська 2017	5,40	0,039	1
РГВ Невського 2004	2,37	0,124	5
РГВ Невського 2005	2,51	0,131	5
РГВ Невського 2006	2,56	0,070	3
РГВ Невського 2007	2,60	0,069	3
РГВ Невського 2008	2,73	0,135	5
РГВ Невського 2009	2,74	0,129	5
РГВ Невського 2010	2,63	0,080	3
РГВ Невського 2011	2,66	0,049	2
РГВ Невського 2012	2,70	0,035	1
РГВ Невського 2013	2,69	0,059	2
РГВ Невського 2014	2,81	0,083	3
РГВ Невського 2015	2,82	0,082	3
РГВ Невського 2016	2,81	0,051	2
РГВ Невського 2017	2,82	0,060	2
РГВ Рогань 2009	134,88	1,780	1
РГВ Рогань 2010	135,26	2,054	2
РГВ Рогань 2011	134,96	2,512	2
РГВ Рогань 2012	132,75	1,780	1
РГВ Рогань 2013	129,62	2,665	2
РГВ Рогань 2014	124,06	3,500	3
РГВ Рогань 2015	120,91	2,192	2
РГВ Рогань 2016	120,73	3,242	3
РГВ Рогань 2017	123,83	2,893	2

Статистична обробка даних була виконана з визначенням максимальних, мінімальних та середніх значень рівнів, стандартних відхилень, коефіцієнтів варіацій по кожному ряду спостережень. Досліджувані сукупності можна вважати однорідними, так як коефіцієнт варіації не перевищує 5 % [14]. Досліджено, що вплив опадів на рівень ґрунтових вод найбільш чітко проявляється з січня по вересень. У зимовий, весняний та літній періоди техногенний вплив на РГВ маскується за рахунок масового танення снігу та випаровування відповідно. Незначне підвищення рівня ґрунтових вод, що спостерігалось в досліджуваних водопунктах в осінній період, на тлі зниження кількості опадів, може мати техногенну природу – наприклад, може бути викликане втратами води з підземних комунікацій, або пов'язане зі зменшенням водовідбору. Експериментально

встановлено, що в осінній період найменше проявляються природні фактори для виявлення техногенного навантаження на рівень ґрунтових вод.

### **3.4 Висновки до третього розділу**

Досліджено зміну РГВ у великому місті за період з 2004 по 2017 рр. на прикладі м. Харків та визначено коефіцієнт кореляції РГВ від кількості опадів для свердловин за кожний рік досліджень. Таким чином, в цілому, наявні дані вказують, що в останнє десятиліття в Харкові спостерігається відносно сталий режим рівнів ґрунтових вод, зумовлений балансуванням з витратною статтею – евапотранспірацією, яка суттєво збільшується при наближенні РГВ до поверхні землі [14, 20]. Але сучасний рівень РГВ на великій частині території Харкова суттєво підвищений відносно природного, на що вказують літературні джерела [26]. Для реального відображення природного процесу з додатковим живленням і впливом евапотранспірації з метою управління цим процесом у межах міст доцільно створити математичну модель зміни рівня ґрунтових вод з такими умовами.

## РОЗДІЛ 4

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ РІВНЯ ГРУНТОВИХ ВОД ПІД ВПЛИВОМ ТЕХНОГЕННИХ ФАКТОРІВ

#### 4.1 Математичне моделювання зміни рівня ґрунтових вод під впливом додаткового живлення

Прогнозування змін РГВ є необхідним при планування стратегії розвитку урбанізованих територій, яке можливо проводити за допомогою математичного моделювання. У межах селітебних і промислових територій, на прикладі м. Харків, що прийнятий як мегаполіс, а окремі його території можуть розглядатись як типові для поширення результатів досліджень на інші міста з населенням близько 250 тис., для прогнозування рівневого режиму ґрунтових вод при зміні водогосподарських умов, розроблено математичну модель, що враховує істотні статті балансу: інфільтрацію атмосферних вод, додаткове живлення в ґрунтові води, транспірацію, випаровування, евапотранспірацію і водовідбір з підземних вод. На основі рівняння Муфтахова А. Ж. була побудована математична модель, яка дозволила отримати розв'язок сформульованої задачі в замкнутому аналітичному вигляді (у вигляді рядів). Це дало можливість провести візуалізацію результатів і підтвердити попередньо отримані автором дані про вплив додаткового живлення на рівень ґрунтових вод з використанням традиційного інженерного підходу.

З метою створення математичної моделі оберемо диференційні рівняння для опису зміни РГВ та відповідні граничні умови.

При цьому прийняті такі припущення:

– зміна РГВ має усталений характер, про що свідчать дані багаторічних досліджень Геологічної партії, в 3-х режимних водопунктах м. Харків;

– розглядаються ділянки з однорідними гідрогеологічними умовами вздовж одного з напрямків, що дозволяє використовувати рівняння плоскої фільтрації.

Для моделювання розглянемо рівняння фільтраційного напору у випадку плоскої фільтрації, яке може бути базовим для створення математичної моделі опису змін РГВ, якою можна врахувати фактори штучних покриттів та евапотранспірації.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (4.1)$$

де  $h$  – рівень ґрунтових вод,  $x, y$  – координати, показані на рис. 4.1,  $\gamma$  – коефіцієнт анізотропії. На території багатьох міст України, значну площу займають штучні дорожні покриття і будови, що перешкоджають природним процесам інфільтрації атмосферних опадів, випаровування та транспірації. Тому при моделюванні зміни рівня ґрунтових вод будемо враховувати існування таких ділянок території, що частково покриті штучними покриттями, де вплив природних і техногенних факторів буде відбуватися лише на незабудованій поверхні цієї ділянки.

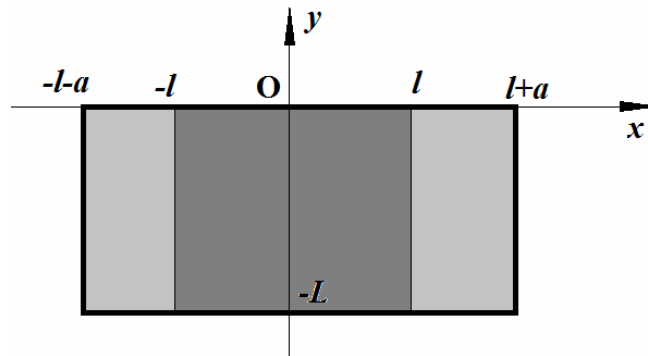


Рисунок 4.1 – Схема розрахункової області для визначення РГВ.

Сформульовано крайові умови для рівняння (4.1), які враховують наявність штучних покриттів, інфільтрацію, випаровування та транспірацію, а також ефект евапотранспірації. Ці умови мають бути сформульовані відносно значень невідомої функції, або її нормальної похідної на межах розрахункової області. Вважаємо, що  $y = 0$  – поверхня ґрунту, рис.4.1.



Припустимо, що на ділянках  $[-l-a \div -l]$  та  $[l \div l+a]$  відбувається вплив природних і техногенних факторів на зміну рівня ґрунтових вод; в той час як на ділянках  $[-l \div 0]$  та  $[0 \div l]$  впливу на рівень ґрунтових вод не відбувається завдяки штучним покриттям (рис. 4.1). Тоді, враховуючи, що зовнішня нормаль на відрізьку  $[-l \div l]$ , при  $y = -L$  співпадає з протилежним напрямком осі  $Oy$ , маємо таку граничну умову, що характеризує наявність штучних покриттів:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{-l \leq x \leq l, y = -L} = 0.$$

На ділянках  $[-l-a, -l]$  та  $[l, l+a]$  відбувається інфільтрація, водовідбір, транспірація і випаровування, тому маємо

$$-\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{l \leq x \leq l+a, y = -L} = f_1 + s_1 - g_1 - d_1 - k_1,$$

де  $f_1$  – додаткове живлення ґрунтових вод (прибуткова частина балансу ґрунтових вод);  $s_1$  – кількість опадів, яка інфільтрується в ґрунтові води (прибуткова частина балансу ґрунтових вод);  $g_1$  – інтенсивність транспірації (видаткова частина балансу ґрунтових вод);  $d_1$  – інтенсивність випаровування (видаткова частина балансу ґрунтових вод);  $k_1$  – водовідбір з ґрунтових вод (видаткова частина балансу ґрунтових вод). Аналогічну умову ставимо на ділянці  $[-l-a, -l]$  при  $y = -L$ , позначаючи відповідні параметри водного балансу з індексом 2.

В подальшому використовуємо симетричну модель, тому вважаємо, що

$$f_1 = f_2; s_1 = s_2; g_1 = g_2; d_1 = d_2; k_1 = k_2.$$

Отримаємо

$$-\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{l \leq x \leq -l-a, y = -L} = f_2 + s_2 - g_2 - d_2 - k_2,$$

Переходимо до умов, які враховують евапотранспірацію.

Оскільки зміна рівнів ґрунтових вод та їх розповсюдження є локальним, і моделювання проводиться для обмежених ділянок міської території (промислових об'єктів, будівель і т. ін.), з однорідними

гідрогеологічними умовами, то можна прийняти, що боковий приплив і відтік рівні між собою, тому

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=l+a} = e_1(y) \\ \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=-l-a} = e_1(y) \end{cases}, \quad e_1(y) = \frac{2}{1 + (y/y_{50})^\tau}, \quad (4.2)$$

де  $\tau$  – відносна мінливість потенційної транспірації;  $y_{50}$  – параметр, що характеризує висоту капілярного всмоктування води;  $y$  – глибина, де відбувається тиск вологи, який всмоктує. У розрахунках згідно [14] прийнято значення  $\tau = 2,2$ . У подальших розрахунках прийнято, що  $y_{50} = 3$ , тобто вважалось, що  $L = 6$  м. Якщо евапотранспірація не враховувалась, то значення  $L$  обговорюються окремо.

Початковий рівень приймається за точку відліку,  $h=0$ .

$$h \Big|_{y=0} = 0.$$

Таким чином, сформулювало таку крайову задачу для визначення невідомої функції  $h(x, y)$ . Знайти розв'язок диференціального рівняння

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \gamma_i^2 \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

при таких крайових умовах:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{-l \leq x \leq l, y = -L} = 0, \quad (4.3)$$

$$-\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{l \leq x \leq l+a, y = -L} = f_1 + s_1 - g_1 - d_1 - k_1, \quad (4.4)$$

$$-\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{l \leq x \leq -l-a, y = -L} = f_2 + s_2 - g_2 - d_2 - k_2, \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=l+a} = e_1(y) \\ \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=-l-a} = e_1(y) \end{cases} \quad (4.6)$$

де функція  $e_1(y) = \frac{2}{1 + (y/y_{50})^c}$  визначена в (4.2).

Зауважимо, що неможливо побудувати одну систему базисних функцій для цієї крайової задачі з неоднорідними крайовими умовами на трьох межах. Тому в роботі запропоновано шукати невідому функцію  $h(x, y)$  у вигляді суми двох доданків

$$h(x, y) = h_1(x, y) + h_2(x, y).$$

Кожній функції  $h_i(x, y)$ ,  $i = 1, 2$  відповідає своя крайова задача, причому в кожній з цих задач наявні однорідні граничні умови, що дає змогу побудувати системи незалежних базисних функцій. Такий засіб не лише дозволяє побудувати розв'язок сформульованої крайової задачі (4.1), (4.3) – (4.6), що враховує наявність штучних покриттів, інфільтрацію, випаровування та транспірацію, а також ефект евапотранспірації, але й дослідити окремо вплив штучних покриттів та ефект евапотранспірації.

Так, крайова задача для функції  $h_1(x, y)$  описує наявність штучних покриттів, інфільтрацію, випаровування та транспірацію, але не враховує ефект евапотранспірації в залежності від глибини. Цю задачу сформулюємо наступним чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} + \gamma^2 \frac{\partial^2 h_1}{\partial y^2} = 0, \\ h_1 \Big|_{y=0} = 0, \\ \frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{-l \leq x \leq l, y = -L} = 0, \\ -\frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{-l-a \leq x < -l, y = -L} = f_1 + s_1 - k_1, \\ -\frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{l < x \leq l+a, y = -L} = f_1 + s_1 - k_1, \\ \frac{\partial h_1}{\partial x} \Big|_{x=\pm(l+a)} = 0 \end{array} \right. \quad (4.7)$$

де  $f_I$  – додаткове живлення ґрунтових вод (прибуткова частина балансу ґрунтових вод);  $s_I$  – кількість опадів, яка інфільтрується в ґрунтові води (прибуткова частина балансу ґрунтових вод);  $k_I$  – водовідбір з ґрунтових вод (видаткова частина балансу ґрунтових вод).

Математична модель працює від будь-якої величини початкового РГВ. Тобто другу умову в системі співвідношень (4.7) можна подати у вигляді

$$h_1 \Big|_{y=0} = H_0,$$

де  $H_0$  – довільна стала. Якщо ввести нову невідому функцію

$$H(x, y) = h_1(x, y) - H_0,$$

то внаслідок рівностей

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial h_1}{\partial x}; \quad \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial h_1}{\partial y},$$

відносно функції  $H$  отримаємо таку ж саме крайову задачу (4.7) з нульовими умовами на поверхні ґрунту.

Для функції  $h_2(x, y)$  отримаємо таку крайову задачу.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 h_2}{\partial x^2} + \gamma^2 \frac{\partial^2 h_2}{\partial y^2} = 0, \\ h_2 \Big|_{y=0} = 0, \\ \frac{\partial h_2}{\partial y} \Big|_{-l-a \leq x \leq l+a} = 0, \\ \frac{\partial h_2}{\partial x} \Big|_{x=\pm(l+a)} = e_1(y) \end{array} \right. \quad (4.8)$$

Розв'язок крайової задачі (4.8) описує вплив на РГВ евапотранспірації в залежності від глибини, але без урахування впливу інфільтрації атмосферних опадів та додаткового живлення. Функцію  $e_1(y)$  подано в формулі (4.2). Тобто розв'язок крайової задачі (4.8) дозволяє дослідити саме вплив евапотранспірації.

## 4.2 Розв'язання крайової задачі щодо зміни рівня ґрунтових вод з урахуванням провідних режимоутворюючих факторів, за відсутності евапотранспірації

Запишемо невідому функцію  $h_1$  у вигляді:

$$h_1(x, y) = X(x) \cdot Y(y). \quad (4.9)$$

Підставимо це зображення в диференційне рівняння (4.1) та отримаємо

$$X''(x)Y(y) + \gamma_1^2 X(x)Y''(y) = 0$$

Звідси маємо

$$\frac{X''(x)}{X(x)} + \gamma_1^2 \frac{Y''(y)}{Y(y)} = 0 \Rightarrow \frac{X''(x)}{X(x)} = -\gamma_1^2 \frac{Y''(y)}{Y(y)}.$$

Оскільки ліва частина отриманої рівності залежить лише від  $x$ , а права – лише від  $y$ , то обидві частини рівності є сталими. Отже маємо

$$\frac{X''(x)}{X(x)} = \lambda = \text{const}.$$

Нехай  $\lambda < 0$ ;  $\lambda = -\mu^2$ . Тоді

$$\frac{X''(x)}{X(x)} = -\mu^2,$$

Звідси

$$X''(x) + \mu^2 X(x) = 0 \quad (4.10)$$

Отримано диференціальне рівняння II порядку. Характеристичне рівняння для нього має вигляд

$$K^2 + \mu^2 = 0 \Rightarrow K = \pm i\mu$$

Загальне рішення для функції  $X(x)$  має вигляд:

$$X(x) = c_1 \cos \mu x + c_2 \sin \mu x$$

Задовольнимо однорідним граничним умовам  $\left. \frac{\partial h_1}{\partial x} \right|_{x=\pm(l+a)} = 0$  з (4.7), з

яких отримаємо

$$X'(l+a) = 0; X'(-l-a) = 0.$$

З цих умов випливає наступна однорідна лінійна система алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} -c_1 \sin \mu(l+a) + c_2 \cos \mu(l+a) = 0 \\ c_1 \sin \mu(l+a) + c_2 \cos \mu(l+a) = 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Для існування нетривіального розв'язку рівнянь (4.11) необхідно, щоб визначник цієї системи дорівнював 0, а саме

$$\Delta = \begin{vmatrix} \cos \mu(l+a) & \sin \mu(l+a) \\ \cos \mu(l+a) & -\sin \mu(l+a) \end{vmatrix} = 0,$$

тобто  $\Delta = -2 \cos \mu(l+a) \cdot \sin \mu(l+a) = -\sin 2\mu(l+a)$ .

З умови  $\Delta = 0$  отримуємо  $\sin 2\mu(l+a) = 0$

Отже,

$$2\mu(l+a) = \pi m, \quad m=0,1,\dots, \quad \mu_m = \frac{\pi m}{2(l+a)}.$$

Таким чином, отримана сукупність рішень:

$$X_m(x) = C_1^m \cos \frac{\pi m}{2(l+a)} x + C_2^m \sin \frac{\pi m}{2(l+a)} x$$

Враховуючи симетричність запропонованої моделі, знайдемо

$$X_m(x) = C^m \cos \frac{\pi m}{l+a} x.$$

Для функції  $Y(y)$  маємо диференціальне рівняння II порядку в вигляді

$$Y''(y) - \frac{\mu^2}{\gamma_1^2} Y(y) = 0. \quad (4.12)$$

з таким характеристичним рівнянням:

$$K^2 - \frac{\mu^2}{\gamma_1^2} = 0$$

Отже,

$$K_{1,2} = \pm \frac{\mu}{\gamma_1},$$

де значення  $\mu$  були визначені вище. Таким чином, загальний розв'язок (4.12) має такий вигляд:

$$Y_m(y) = D_1^m \exp\left(\frac{\mu_m}{\gamma} y\right) + D_2^m \exp\left(-\frac{\mu_m}{\gamma} y\right)$$

З граничних умов отримаємо

$$Y_m(0) = 0 \Rightarrow D_1^m + D_2^m = 0; D_1^m = -D_2^m.$$

Тоді

$$Y_m(y) = D^m \operatorname{sh} \frac{\mu_m}{\gamma} y = D^m \operatorname{sh} \frac{\pi m}{(l+a)\gamma} y.$$

Таким чином, побудовано базисну систему для побудови розв'язку крайової задачі (4.7) у вигляді:

$$h_1^m = E^m \cos \frac{\pi m x}{(l+a)} \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi m y}{(l+a)\gamma}, \quad m = 1, 2, \dots$$

Тобто, загальний розв'язок крайової задачі (4.7) є таким:

$$h_1(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} E^m \cos \frac{\pi m x}{(l+a)} \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi m y}{(l+a)\gamma}. \quad (4.13)$$

Константи  $E^m$  будуть визначені з другого, третього та четвертого рівнянь в (4.7).

Для цього обчислимо похідну від функції (4.13) за змінною  $y$  в припущенні, що  $y = -L$ , та отримаємо

$$\left. \frac{\partial h_1(x, y)}{\partial y} \right|_{y=-L} = \sum_{m=1}^{\infty} E^m \frac{\pi m}{(l+a)\gamma} \cos \frac{\pi m x}{(l+a)} \cdot \operatorname{ch} \frac{\pi m L}{(l+a)\gamma}. \quad (4.14)$$

Введемо функцію

$$C_2(x) = \begin{cases} a_1 & -l-a < x < l \\ 0 & -l \leq x \leq l \\ a_1 & l < x < l+a \end{cases} \quad (4.15)$$

Ця функція є похідною від функції (4.13), яка описується виразом (4.14). Відносно сталої  $a_1$  зауважимо, що

$$a_1 = f_1 + s_1 - k_1.$$

Таким чином, для визначення сталих  $E^m$  маємо таке співвідношення

$$\sum_{m=1}^{\infty} E^m \frac{\pi m}{(l+a)\gamma} \cos \frac{\pi m x}{(l+a)} \cdot \operatorname{ch} \frac{\pi m L}{(l+a)\gamma} = C_2(x). \quad (4.16)$$

Здійсимо скалярний добуток правої та лівої частин (4.16) послідовно на  $\cos \frac{\pi k}{(l+a)} x$  при  $k = 1, 2, \dots$ .

Оскільки функції  $C_2(x)$  і  $\cos \frac{\pi k}{(l+a)} x$  є парними, то отримуємо

$$2 \int_0^{l+a} C_2 \cos \frac{\pi k}{l+a} x dx = 2E^k \operatorname{ch} \frac{\pi k L}{(l+a)\gamma} \int_0^{l+a} \cos^2 \frac{\pi k}{l+a} x dx,$$

або

$$2 \int_l^{l+a} a_1 \cos \frac{\pi k}{l+a} x dx = 2E^k \operatorname{ch} \frac{\pi k L}{(l+a)\gamma} \int_0^{l+a} \cos^2 \frac{\pi k}{l+a} x dx.$$

Тобто маємо

$$a_1 \frac{l+a}{\pi k} \sin \frac{\pi k l}{l+a} = \frac{l+a}{2} E^k \operatorname{ch} \frac{\pi k L}{(l+a)\gamma}.$$

Звідси для сталих  $E_k$  знаходимо такі вирази:

$$E_k = \frac{2a_1}{\pi k} \frac{\sin \frac{\pi k l}{l+a}}{\operatorname{ch} \frac{\pi k L}{(l+a)\gamma}} \quad (4.17)$$

Вирази (4.17) свідчать про високу швидкість збіжності ряду (4.13), оскільки містять з знаменника добуток  $\pi k \operatorname{ch}(\pi k l / ((l+a)\gamma))$ , що прямує до нескінченості швидше за експоненту.



### 4.3 Розв'язання крайової задачі щодо зміни рівня ґрунтових вод з урахуванням евапотранспірації

Переходимо до розв'язання крайової задачі (4.8).

Запишемо невідому функцію  $h_2$  у вигляді:

$$h_2(x, y) = X(x) \cdot Y(y).$$

Підставимо це зображення в диференційне рівняння (4.1) та отримаємо рівності

$$X''(x)Y(y) + \gamma_1^2 X(x)Y''(y) = 0,$$

$$\frac{X''(x)}{X(x)} = -\gamma_1^2 \frac{Y''(y)}{Y(y)}.$$

Для функції  $Y(y)$  на цей раз маємо таке диференційне рівняння:

$$Y''(y) + \frac{\mu^2}{\gamma_1^2} Y(y) = 0.$$

Його загальний розв'язок подамо в вигляді

$$Y(y) = c_1 \cos \frac{\mu}{\gamma} y + c_2 \sin \frac{\mu}{\gamma} y.$$

Задовольняємо граничні умови

$$Y(0) = 0 \Rightarrow c_1 = 0; \quad Y'(L) = c_2 \frac{\mu}{\gamma} \cos \left( \frac{\mu}{\gamma} L \right) = 0.$$

З використанням цих умов для характеристичних чисел отримуємо співвідношення

$$\frac{\mu L}{\gamma} = \frac{\pi}{2} + \pi k; \quad \mu_k = \frac{\pi \gamma}{L} \left( \frac{1}{2} + k \right); \quad k = 0, 1, \dots$$

Тоді функції  $Y_k(y)$  набувають вигляду

$$Y_k(y) = C_k \sin \left( \frac{\pi}{L} \left( \frac{1}{2} + k \right) y \right), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Функцію  $X(x)$  визначимо з диференційного рівняння

$$X''(x) - \mu^2 X(x) = 0.$$

Використовуємо загальний розв'язок

$$X_m(x) = D_1^m \exp(\mu_m x) + D_2^m \exp(-\mu_m x).$$

Враховуючи вигляд крайових умов, з'ясовуємо, що шукана функція є непарною. Тоді маємо таку базисну систему для побудови розв'язку крайової задачі (4.8):

$$h_2^m = F^m \sin \frac{\pi(0.5+m)y}{L} \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi\gamma(0.5+m)x}{L}, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Тобто, загальний розв'язок крайової задачі (4.8) приймає вигляд:

$$h_2(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} F^m \sin \frac{\pi(0.5+m)y}{L} \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi\gamma(0.5+m)x}{L} \quad (4.18)$$

Для визначення констант  $F^m$  використовуємо крайові умови, які зображуються четвертим співвідношенням в (4.8). Спочатку обчислюємо похідну

$$\left. \frac{\partial h_2(x, y)}{\partial x} \right|_{x=\pm(l+a)} = \sum_{m=0}^{\infty} F^m \frac{\pi\gamma(0.5+m)}{L} \sin \frac{\pi(0.5+m)y}{L} \cdot \operatorname{ch} \frac{\pi\gamma(0.5+m)(l+a)}{L}.$$

Це дало змогу для визначення сталих  $F^m$  отримати таке співвідношення:

$$e_1(y) = \sum_{m=0}^{\infty} F^m \frac{\pi\gamma(0.5+m)}{L} \sin \frac{\pi(0.5+m)y}{L} \cdot \operatorname{ch} \frac{\pi\gamma(0.5+m)(l+a)}{L},$$

або, враховуючи вигляд функції  $e_1(y)$  з формулі (4.2)

$$\frac{2}{1 + (y/y_{50})^\tau} = \sum_{m=0}^{\infty} F^m \frac{\pi\gamma(0.5+m)}{L} \sin \frac{\pi(0.5+m)y}{L} \cdot \operatorname{ch} \frac{\pi\gamma(0.5+m)(l+a)}{L} \quad (4.19)$$

Обчислимо скалярні добутки правої та лівої частин рівняння (4.19) на функції  $\sin \frac{\pi(0.5+k)y}{L}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Отримаємо вирази для знаходження коефіцієнтів  $F^m$

$$\int_{-L}^0 \frac{2}{1 + (y/y_{50})^\tau} \sin \frac{\pi(0.5+k)y}{L} dy =$$

$$= F^k \frac{\pi\gamma(0.5+k)}{L} \operatorname{ch} \frac{\pi\gamma(0.5+k)(l+a)}{L} \int_{-L}^0 \sin^2 \frac{\pi(0.5+k)y}{L} dy.$$

Введемо позначення

$$I_k = \int_{-L}^0 \frac{2}{1 + (y/y_{50})^\tau} \sin \frac{\pi(0.5+k)y}{L} dy,$$

$$J_k = \frac{\pi\gamma(0.5+k)}{L} \operatorname{ch} \frac{\pi\gamma(0.5+k)(l+a)}{L},$$

маємо

$$I_k = F_k J_k, \quad F_k = \frac{I_k}{J_k}. \quad (4.20)$$

Зауважимо, що інтеграли  $I_k$  не можливо обчислити в елементарних функціях, чому їх числові значення знаходились за допомогою 6-точкових квадратур Гауса. Тобто, коефіцієнти  $F^m$  визначені.

Зауважимо, що вирази для знаходження  $F^m$  також свідчать про високу швидкість збіжності ряду (4.18), оскільки містять з знаменниках добутки еквівалентні  $\pi k \operatorname{ch}(\pi k)$ , що прямують до нескінченості швидше за експоненту

Таким чином, розв'язок крайової задачі (4.1), (4.3) – (4.6) отримано в вигляді

$$h(x, y) = h_1(x, y) + h_2(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} E^m \cos \frac{\pi m x}{(l+a)} \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi m y}{(l+a)\gamma} +$$

$$+ \sum_{m=0}^{\infty} F^m \sin \frac{\pi(0.5+m)y}{L} \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi\gamma(0.5+m)x}{L}. \quad (4.21)$$

Зауважимо, що при застосуванні формули (4.21) враховується наявність штучних покриттів, інфільтрація, випаровування та транспірація, а також ефект евапотранспірації.

#### 4.4 Аналіз результатів числового розрахунку

Для розрахунків були прийняті наступні значення складових водного балансу, які стосуються живлення атмосферними опадами ГВ, додаткового живлення, транспірації, випаровування, водовідбору та евапотранспірації.

Середнє значення багаторічного живлення ґрунтових вод обираємо як найбільш несприятливу величину з результатів лізіметричних досліджень станції «Феофанія» у с.Хотів на околиці м.Києва з сумарною річною кількістю опадів 560 мм/рік (що наближається до середньої річної кількості опадів у м. Харкові – 530 мм) –  $1,5 \cdot 10^4$  м/добу, та з даних Коднянської дослідної ділянки в с. Ружки Житомирської області при сумарній річній кількості опадів 600 мм/рік, де середнє багаторічне живлення ґрунтових вод становить 0,05 мм/доб ( $0,5 \cdot 10^4$  м/добу) [24]. Тому середнє багаторічне живлення ґрунтових вод становить 0,15 мм/доб ( $1,5 \cdot 10^4$  м/добу).

Кількість опадів, яка інфільтрується в ґрунтові води  $s_l = 1,5 \cdot 10^4$  м/добу. Коефіцієнти  $g_1$  та  $d_1$  вибираємо згідно [21–23].

Інтенсивність транспірації  $g_l = 0,15 \div 1,47$  г/дм<sup>2</sup>·рік =  $6,25 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>·добу та інтенсивність випаровування  $d_l = 0,21$  г/дм<sup>2</sup>·рік =  $8,75 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>·добу

В першому наближенні вважаємо, що коефіцієнт анізотропії  $\gamma=1$ .

Нехай  $T$  – відносна транспірація,  $T = 0,7 \div 0,85$

$$T = \frac{I_t}{I_e} \quad (4.22)$$

де  $I_t$  – інтенсивність транспірації ( $g_l$ ).

Тоді з вищенаведеного виразу (4.22) отримаємо  $I_e$  – інтенсивність випаровування ( $d_l$ ).

Величина додаткового живлення згідно [26] дорівнює

$$f_l = 210000 \text{ тис м}^3/\text{рік} = 0,7 \text{ м/рік} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ м/доб.}$$

Величина водовідбору з ґрунтових вод  $k_l = 19743 \text{ м}^3/\text{доб} = 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ м/доб.}$

Схему зміни рівня ґрунтових вод, що відповідає крайовій задачі (4.7), подано на рис. 4.2.

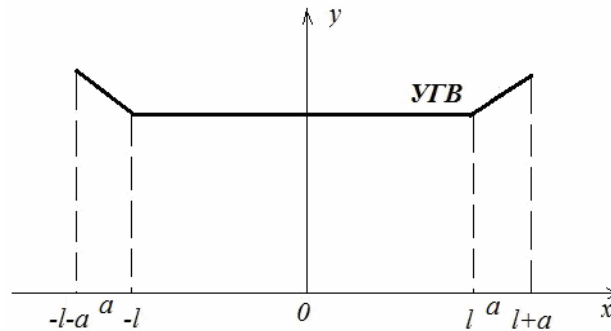


Рисунок 4.2 – Схема зміни рівня ґрунтових вод.

Задачі (4.7), (4.8) розв'язані шляхом розкладання у ряди Фур'є. Проведений числовий аналіз з використанням пакету Maple довів, що п'яти членів розкладу в відповідних рядах достатньо для забезпечення точності рішення  $\varepsilon = 10^{-3}$ .

При моделюванні зміни рівня ґрунтових вод м. Харків, розглянуто типову ділянку території, частково покриту штучними покриттями на поверхні ґрунту, де вплив природних і техногенних факторів відбувається тільки на вільній поверхні цієї ділянки.

Розроблена математична модель враховує істотні статті балансу: живлення ґрунтових вод за рахунок атмосферних вод, додаткове живлення в ґрунтові води, евапотранспірацію і водовідбір з підземних вод.

Використовуючи пакет Maple (Додаток В) отримаємо значення  $\Delta h$ , що візуалізовано розрахунками  $\Delta h$  для обмежених ділянок території промислового м. Харків [21–23].

Зупинимось спочатку на ситуаціях, коли ефектами евапотранспірації нехтують.

Візуалізація можливої ситуації зміни РГВ на території Харкова подана на рис. 4.3. Змодельована ситуація, в якій водовідбір перевищує додаткове живлення – на рис. 4.4. Отримано значення зміни РГВ при незмінній

евапотранспірації, що візуалізовано розрахунками для обмежених ділянок території м. Харків [21–23].

Розглянуті два варіанти числових даних: максимальна зміна РГВ та зміна РГВ при заданих параметрах оптимізації водного балансу ґрунтових вод.

Вважалось, що  $l = 500$ ,  $a = 1000$ ,  $L = 6$  (значення подані в метрах).

Аналіз отриманих даних показав, що в першому варіанті відбувається зміна рівня ґрунтових вод на  $\Delta h = 0,00007$  м за добу. Ці дані приведені на рис. 4.3.

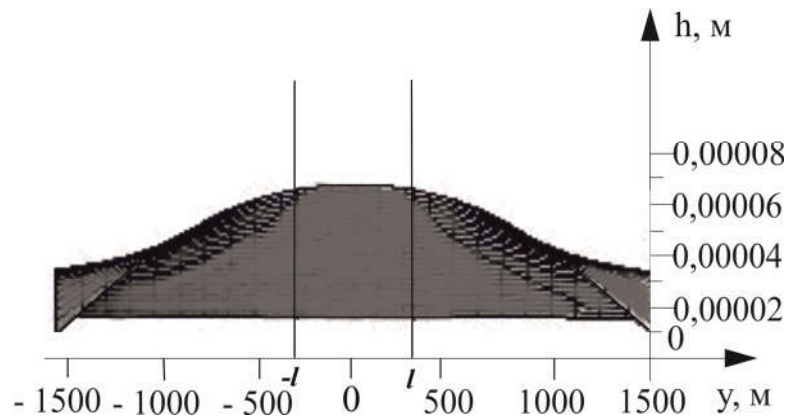


Рисунок 4.3 – Зміна рівня ґрунтових вод, м за добу.

В другому варіанті з'ясовано, що відбувається зміна рівня ґрунтових вод на  $\Delta h = 0,000012$  м за добу (рис. 4.3).

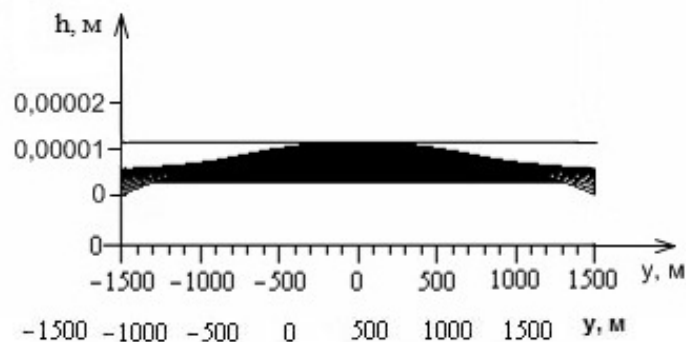


Рисунок 4.4 – Зміна рівня ґрунтових вод при заданих параметрах, м за добу.

У цьому варіанті вплив техногенних факторів на території Харкова прогнозний підйом РГВ в середньому складе на 1-й рік 0,004 м, на 50-й рік 0,2 м. Приймаючи умови, при яких водовідбір перевищує додаткове

живлення, отримуємо на 50-й рік підвищення рівня ґрунтових вод в 7,5 рази менший, ніж в ситуації, що склалася відповідно зображеній на рис. 4.3.

Зроблений прогноз змін рівня ґрунтових вод для м. Харків на перспективу 50 років вказує, що на 1-й рік підйом рівня складе 0,03 м, а на 50й рік – вже 1,5 м.

Далі вивчався вплив евапотранспірації на РГВ. На рис. 4.5 наведено графік функції  $e_1(y)$ , що визначена в умовах (4.2).

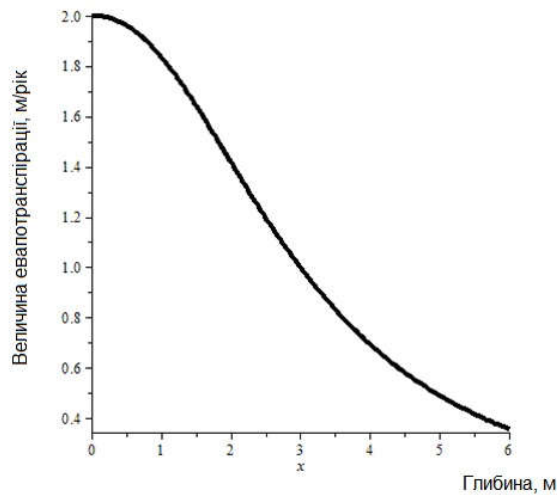


Рисунок 4.5 – Залежність евапотранспірації від глибини

Графіки функції  $h_1$  та  $h_2$  подані на рис. 4.6.

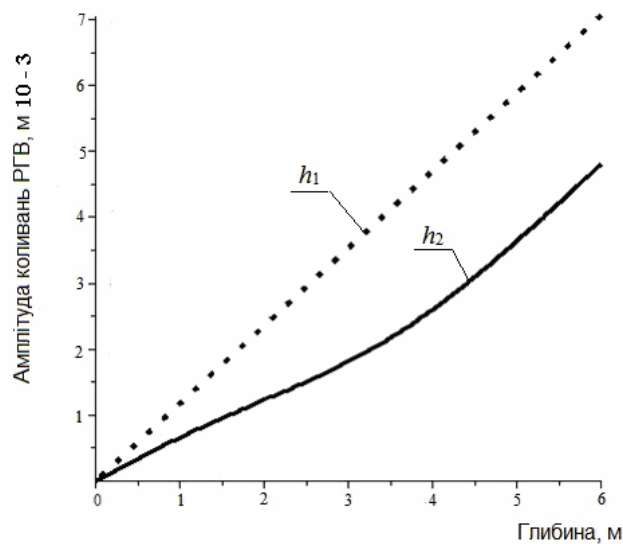


Рисунок 4.6 – Графіки функції  $h_1$  та  $h_2$ .

Отримано значення зміни РГВ при незмінній евапотранспірації, що візуалізовано розрахунками для обмежених ділянок території м. Харків на рис. 4.2, де зображена функція  $h_1(x,y)$ .

Отримані також значення зміни РГВ при змінній евапотранспірації, які зображені на рис. 4.7.

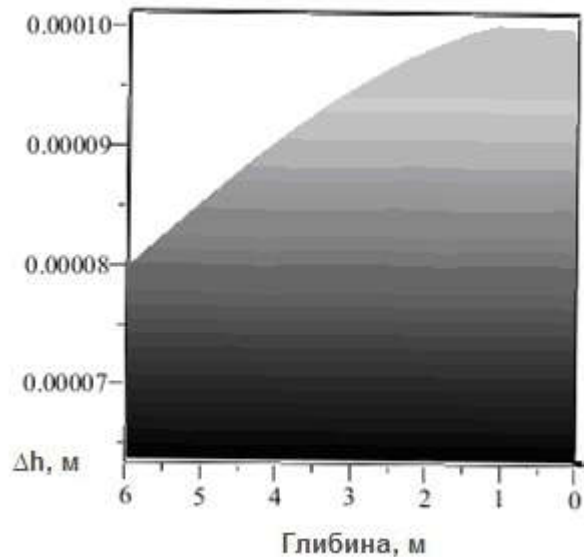


Рисунок 4.7 – Інтенсивність зниження РГВ під дією евапотранспірації.

Зроблений прогноз максимально високих РГВ (рис. 4.10) для м. Харків без врахування дії евапотранспірації на перспективу 50 років вказує, що на 1й рік підйом рівня складе 0,03 м, а на 50й рік – вже 1,5 м. З метою оптимізації водного балансу підземних вод для забезпечення екологічної безпеки підтоплених територій великого міста, було проведено балансування видаткових та прибуткових статей. Балансування відбувається при зниженні додаткового живлення в 2,4 рази, тобто додаткове живлення необхідно зменшити в середньому на 240 000 м<sup>3</sup>/добу, а також при збільшенні водовідбору з першого від поверхні водоносного горизонту в середньому в 15 разів, тобто при збільшенні водовідбору в межах м. Харків в середньому на 300 000 м<sup>3</sup>/добу. Оскільки якість ґрунтових вод у м. Харків невисока, розрахований об'єм води може бути використаний для технічних цілей або для обводнення річок.



Також зроблений прогноз зміни РГВ із урахуванням дії евапотранспірації (рис. 4.7) на перспективу 50 років. Під штучними покриттями на 1-й рік підйом рівня складе 0,05 м, а на 50 й рік – вже 2,56 м. На території, вільній від штучних покриттів РГВ буде стабілізований дією евапотранспірації. Таким чином, поширення площі штучних покриттів по території міста сприятиме зниженню дії евапотранспірації та стійкому підвищенню РГВ та розвитку підтоплення.

#### **4.5 Оцінка адекватності математичної моделі фактичним даним досліджень зміни РГВ**

Оцінка адекватності результатів, отриманих при математичному моделюванні, проведена на двох різних за ландшафтними умовами ділянках, які є типовими для великих міст [14]. Перша ділянка переважно розташована посеред приватного сектору, та має вільну від покриттів поверхню. Друга ділянка, практично повністю вкрита штучними покриттями.

Перша ділянка, де наявні ретроспективні дані, розташована в історичній центральній частині міста Харкова, обмежена пров. Банним, майданами Пролетарським, Павлівським та Рибним, вул. Університетською (рис. 4.8). Геоморфологічно ділянка розташована в межах заплави біля злиття р. Лопань і р. Харків. Рівень води в річках регулюється Гончарівською греблею з відміткою НПГ 100,5 м. Інтенсивна забудова цієї території спричинила додаткові техногенні фактори впливу на підвищення РГВ. Ділянка практично повністю вкрита штучними покриттями.

Інженерно-геологічні вишукування на цій ділянці проводились Українським головним виробничим НДІ інженерно-технічних та екологічних вишукувань (УкрНДІНТІЗ) в період з 1965 по 2016 рр. (табл. 4.1). Всі наведені точки контролю знаходяться в одному водоносному горизонті (рис. 4.13).

Друга ділянка, де автор проводила дослідження описана в Розділі 3.

В роботі проводиться адаптація математичної моделі на фактичних даних моніторингу рівня ґрунтових вод центральної частини м. Харків.

Рівні ґрунтових вод в точках контролю на ділянці злиття річок Лопань і Харків, вимірювання проведені УкрНДІНТІЗ та представлені на рис. 4.7.

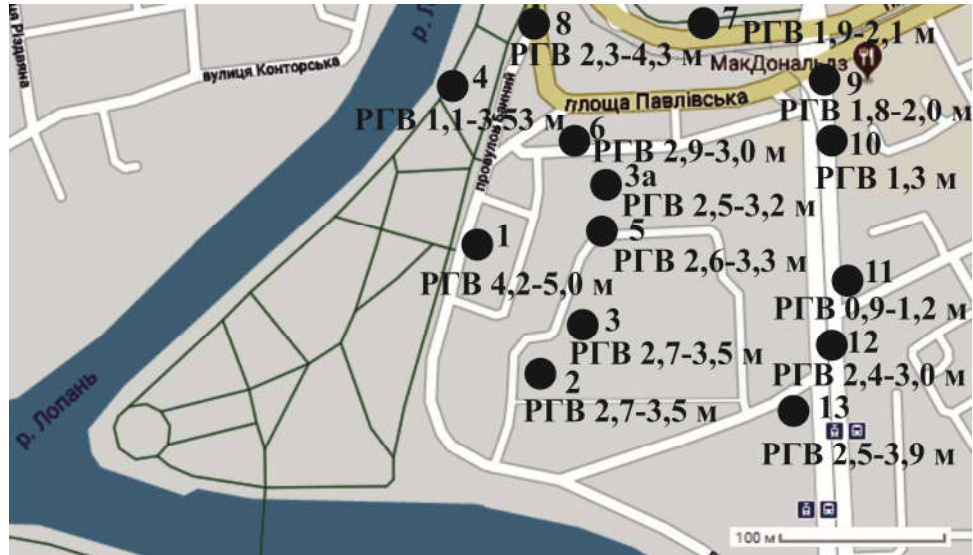


Рисунок 4.8. – Рівні ґрунтових вод в точках контролю на ділянці злиття річок Лопань і Харків

Зміни рівня ґрунтових вод в точках контролю на ділянці злиття річок Харків і Лопань наведені в табл. Г.1 (Додаток Г) [14].

Порівняння моніторингових даних з прогнозованими щодо зміни РГВ наведені в Таблиці Г.2 (Додаток Г).

Порівняння результатів моделювання та даних натурних спостережень вказує на адекватність створеної моделі фактичним даним, що представлені у Додатку Г. Врахування дії евапотранспірації з глибиною дозволяє робити більш точний прогноз зміни РГВ. Тож, дія евапотранспірації стабілізує та знижує РГВ (точки А,Б), а на територіях, вкритих штучними покриттями (точки 1,2,3,5,6,8,10) неможлива дія евапотранспірації, тому відбувається підйом РГВ [14].

#### 4.6 Висновки до четвертого розділу

1. Розроблений прогноз максимально високих РГВ для м. Харків без врахування дії евапотранспірації на перспективу 50 років вказує, що на 1-й рік підйом рівня складе 0,03 м, а на 50й рік – вже 1,5 м [24]. З метою оптимізації водного балансу підземних вод для забезпечення екологічної безпеки підтоплених територій великого міста, було проведене балансування видаткових та прибуткових статей. Балансування відбувається при зниженні додаткового живлення в 2,4 рази, тобто додаткове живлення необхідно зменшити в середньому на 240 000 м<sup>3</sup>/добу, а також при збільшенні водовідбору з першого від поверхні водоносного горизонту в середньому в 15 разів, тобто при збільшенні водовідбору в межах м. Харків в середньому на 300 000 м<sup>3</sup>/добу. Оскільки якість ґрунтових вод у м. Харків невисока, розрахований об'єм води може бути використаний для технічних цілей або обводнення річок [24].

2. Також зроблений прогноз зміни РГВ із урахуванням дії евапотранспірації на перспективу 50 років. Під штучними покриттями на 1-й рік підйом рівня складе 0,05 м, а на 50-й рік – вже 2,56 м. На території, вільній від штучних покриттів РГВ буде стабілізований дією евапотранспірації. Таким чином, поширення площі штучних покриттів по території міста сприятиме зниженню дії евапотранспірації та стійкому підвищенню РГВ та розвитку підтоплення [14].

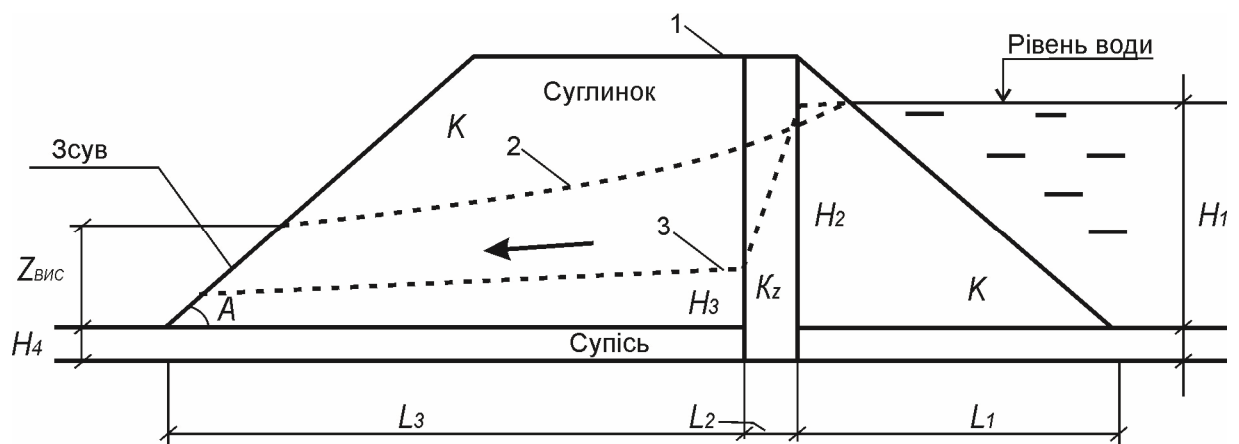
3. Порівняння результатів моделювання та даних натурних спостережень вказує на адекватність створеної моделі фактичним даним з відносним відхиленням не більше 20%. Врахування дії евапотранспірації з глибиною дозволяє підвищити точність прогнозу зміни РГВ [14].

## РОЗДІЛ 5

### ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПІДТОПЛЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЗАБУДОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ ВЕЛИКИХ МІСТ

#### 5.1 Інженерний захист автодоріг від шкідливої дії підземних вод для попередження екологічно небезпечних явищ

Автодороги є важливими артеріями міст, що потребують регулярного ретельного догляду для збереження їх в робочому стані. Проблема бездоріжжя в Україні є дуже актуальною. Крім природних факторів, що впливають на стійкість автошляхів, є фактори техногенного походження, зокрема підтоплення, викликане порушенням водного балансу підземних вод. Тому актуальним є вирішення проблеми відведення ґрунтових вод та поверхневого стоку з доріг. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є влаштування протифільтраційної завіси (рис. 5.1) вздовж автошляху [61]. Протифільтраційні завіси можуть влаштовуватися у вигляді як самостійних конструкцій, так і в поєднанні з водозниженням і дренажами. При проектуванні протифільтраційних завіс необхідно дотримуватись вимог СНіП 2.06.14-85 та СП 45.13330.2012, які передбачають визначення трьох основних параметрів. Ці параметри розраховані за методикою аналітичного розв'язання диференціальних рівнянь фільтрації із залученням комп'ютерної програми Maple.



1 – протифільтраційна завіса; 2 – дренажна система

Рисунок 5.1 – Схема поперечного перерізу ґрунтового насипу

Використані формули для послідовного розрахунку напорів на стінках завіси:

$$H_2 = \sqrt{\frac{H_4^2 + \frac{H_4^2 \cdot L_3}{L_1} \cdot \left(1 + \frac{K \cdot L_2}{K_z \cdot L_3}\right)}{1 + \frac{L_3}{L_1} \left(1 + \frac{K \cdot L_2}{K_z \cdot L_3}\right)}}; \quad (5.1)$$

$$H_3 = \sqrt{H_4^2 + \left(H_1^2 - H_2^2 \cdot \frac{L_3}{L_1}\right)}, \quad (5.2)$$

де  $H_2$  і  $H_3$ , – напори на стінках завіси, м;  $H_1$  і  $H_4$ , – напори без завіси, м;  $L_2$  – довжина завіси, м;  $L_1, L_3$  – зона впливу дренажу, м,  $K_z$  – коефіцієнт фільтрації завіси,  $K$  – коефіцієнт фільтрації зони дренажування. Спочатку визначені  $H_2$ , а потім  $H_3$ . Далі знаходиться фільтраційна витрата по Дюпюї:

а) крізь завісу:

$$Q_z = \frac{K_z \cdot (H_2^2 - H_3^2)}{2L_2}, \quad (5.3)$$

б) крізь насип без завіси:

$$Q = \frac{K \cdot (H_1^2 - H_4^2)}{2(L_1 + L_2 + L_3)}, \quad (5.4)$$

Наведене математичне моделювання дозволяє визначити основні геометричні параметри протифільтраційних завіс, які у подальшому використовуються для їх проектування.

З рівняння руху рідкого середовища Полубарінової-Кочіної, було отримано рівняння Дюпюї, яке використано для рішення стаціонарної задачі визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу. Далі було розв'язано стаціонарну задачу визначення витрати води крізь протифільтраційну завісу. Встановлено, що використання протифільтраційної завіси є ефективним навіть при таких параметрах:

$K_f \leq 0,7$  м/доб, при більшій довжині та меншому заглибленні самої завіси.

Отримані розрахунки параметрів дозволять використовувати протифільтраційні завіси в проектах захисту автошляху від екологічно небезпечної дії ґрунтових вод [61].

## **5.2 Система попередження підтоплення забудованої території на прикладі м. Харкова**

Ефективна співпраця між органами державної влади, екологічними організаціями, підприємствами з регулювання води та інших зацікавлених сторін можлива шляхом, наприклад, створення місцевої Комісії води, як це реалізовано в країнах ЄС, зокрема у Великобританії. Це більше, ніж необхідно для регіональної координації та реалізації цілісного підходу:

- необхідний перехід від оборонних дій від небезпечного підвищення РГВ до управління ризиком підтоплення;

- реалізація стратегії в області підтоплення повинна бути узгоджена на місцевому – регіональному – національному – міжнародному рівні в межах басейну річки;

- пріоритет повинен віддаватися інтегрованим заходам з управління водними ресурсами для всієї площі водозбору, а не на управління підтопленням як таким;

- прогнозування зміни РГВ і розвитку підтоплення може бути ефективним в поєднанні з іншими превентивними заходами. Традиційні і нові технології і методи прогнозування підтоплення повинні співіснувати і використовуватися для взаємної перевірки та порівняння отриманих даних, для більш ефективного та точного прогнозу;

- використання історичної інформації і досвіду, проведення ретроспективного аналізу буде сприяти складанню більш чітких обґрунтованих прогнозів.

Система своєчасного і надійного попередження та прогнозування підтоплення, залежна від басейнових даних, а не секторальних є одним з основних умов для поліпшення захисту від підтоплення. Це означає, що необхідно узгодити технічні процедури для гідрологічних та метеорологічних прогнозів, порядок застосування, зберігання та обміну даними між сусідніми країнами.

На основі аналізу європейського та українського досвіду боротьби з підтопленням, та прогнозування зміни рівня ґрунтових вод на створеній моделі розроблено систему попередження підтоплення.

Система включає схему взаємодії органів управління та завдань попередження і ліквідації наслідків підтоплення (рис. Д.1), алгоритм дій у ході проведення моніторингу за РГВ на підтоплених і потенційно підтоплених територіях (рис. 5.1) та Проект комплексу заходів з попередження підтоплення, що сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки урбанізованих територій, які схильні до підтоплення.

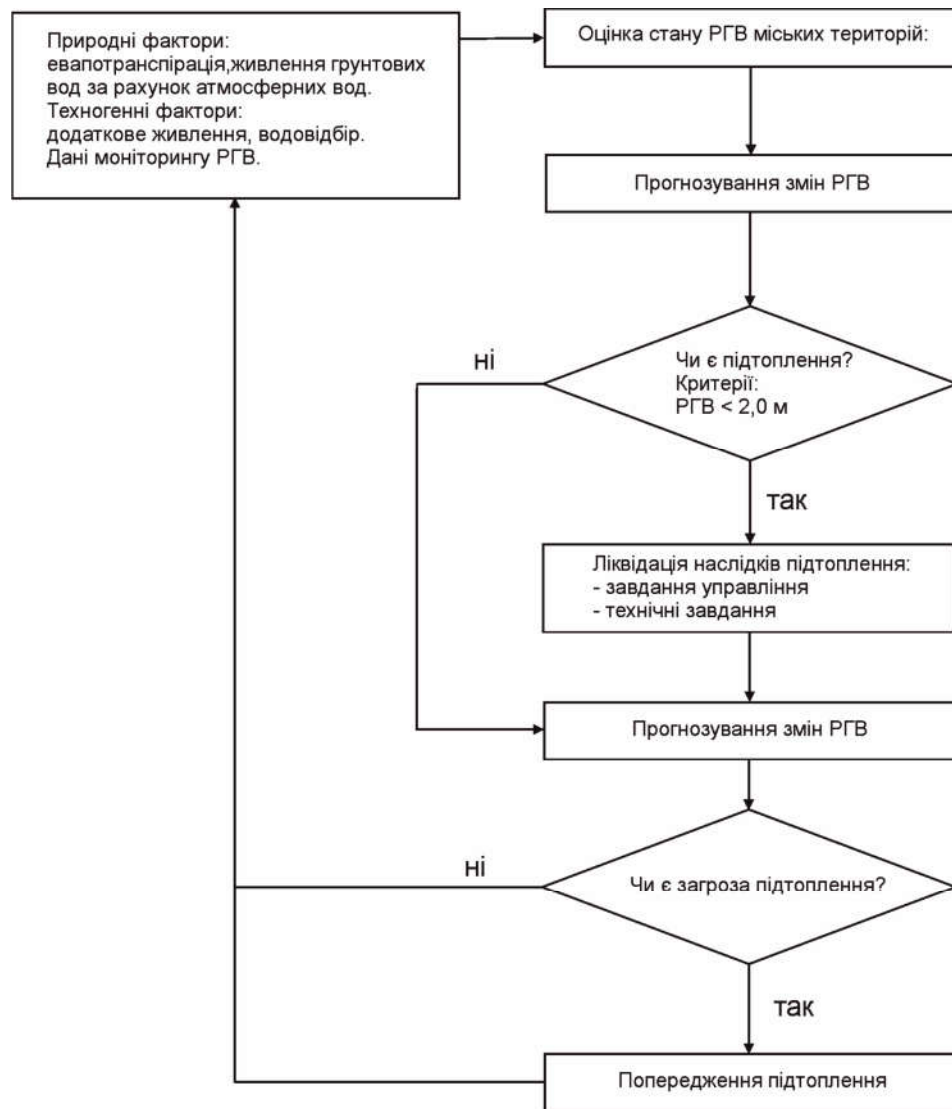
Розроблено типову схему взаємодії органів управління та завдань попередження і ліквідації наслідків підтоплення рис. Д.1 (Додаток Д).

Алгоритм дій у ході моніторингу за РГВ на підтоплених і потенційно підтоплених територіях представлено на рис. 5.1.

На відміну від інших, пропонований алгоритм дозволяє враховувати окрім підтоплених територій, території з ризиком підтоплення, що значно підвищує рівень екологічної безпеки об'єктів довкілля. Якщо територія була підтоплена, то доцільно завжди в майбутньому оцінювати загрозу підтоплення.

Умовою застосування алгоритму дій у ході моніторингу за РГВ на підтоплених і потенційно підтоплених територіях запропоновано вважати забудовану територію потенційно підтоплюваною в усіх випадках, коли прогнозований рівень підземних вод може перевищувати позначку підшоши фундаменту протягом всього проектного терміну експлуатації будівлі. Також запропоновано створення в системі будівництва та розвитку міста Харкова

власної спостережної мережі свердловин, що розміщується на ділянках нового будівництва. В умовах, щорічного збільшення кількості будівельних об'єктів, коли буряться нові свердловини, це більш реально, ніж відновлення розваленої спостережної мережі свердловин. Режимна мережа повинна дозволяти відстежувати вплив дренажних систем, підземних споруд, комунікацій (в т.ч. водонесучих) на режим підземних вод.



Гранична глибина рівня ґрунтових вод для територій міст згідно ДБН В.1.1 – 25–2009 [81] складає не менше 2,0 м і не менше 0,5 м від підшосов фундаментів споруд

Рисунок 5.1 – Алгоритм дій у ході проведення моніторингу за РГВ на підтоплених і потенційно підтоплених територіях



Запропоновані заходи повинні бути інтегровані в процес планування та прийняття рішень щодо розвитку процесу підтоплення та боротьби з ним в м. Харків та інших містах країни [86–95].

Пропонована автором система попередження підтоплення міських територій передбачає необхідність участі громадськості у вирішенні проблеми підтоплення, ефективну співпрацю між органами державної влади, екологічними організаціями, управлінням водних ресурсів та іншими зацікавленими сторонами.

### **5.3 Проект комплексу заходів, щодо запобігання підтопленню та екологічно небезпечним явищам**

Проект комплексу заходів щодо забезпечення екологічної безпеки урбанізованих територій, що зазнають вплив підтоплення ґрунтовими водами (табл. Д.1, Додаток Д) створений враховуючи Європейський досвід [77–79, 89] боротьби з підтопленням, а також існуючі умови для реалізації цих заходів в Україні на прикладі великого промислового міста Харкова.

В таблиці Д.1 (Додаток Д) запропоновано заходи та завдання із забезпечення екологічної безпеки урбанізованих територій, що зазнають вплив підтоплення ґрунтовими водами [100–105].

Заходи, які описуються в таблиці повинні бути інтегровані в процес планування та прийняття рішень щодо розвитку процесу підтоплення та боротьби з ним в м. Харків та інших містах країни [106].

Пропонований автором проект комплексу заходів відноситься до попередження підтоплення міських територій та є багатокomпонентною системою заходів та керівних принципів, передбачає необхідність участі громадськості у вирішенні проблеми підтоплення, ефективну співпрацю між органами державної влади, екологічними організаціями, підприємствами з регулювання води та іншими зацікавленими сторонами.

#### **5.4 Рекомендації щодо попередження підтоплення та підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій великих міст**

Запропоновано наступні рекомендації щодо попередження підтоплення та підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій великих міст:

– Доцільність участі громадськості у вирішенні проблеми підтоплення. Громадськість повинна усвідомлювати існування проблеми підтоплення і можливість участі у вирішенні цієї проблеми. Люди все більше і більше мобільні і часто мають мало стимулів до участі в ініціативах довгострокового управління, не зацікавлені дбайливо ставитися до природних ресурсів. На сьогоднішній день багато українців не підозрюють про те, чим загрожує підтоплення, які його причини та наслідки, як впливає людина на розвиток цього процесу, як формуються нормативи водокористування, навіщо потрібно економити водні ресурси [107–111]. Більшість українців не звикло відмовляти собі в комфортному користуванні водними ресурсами. Люди приймають щоденні ванни, поливають городи з вікна квартири, залишають включеними крани, не стежать за витокami, будують нові будівлі прямо на березі водних об'єктів нехтуючи оцінкою впливу на навколишнє середовище, не враховуючи вимоги будівельних нормативів і т.д.

Щоб зменшити потенційний збиток від підтоплення, зацікавлена громадськість і влада повинні тісно спілкуватися. Правильні попереджувальні заходи і прогнози - це важливі елементи для адекватної поведінки громадськості під час підтоплення. Влада і громадськість повинні розробити інформаційну політику, яка охоплює оцінку ризику і полегшує участь громадськості в процесі прийняття рішень. Громадськість повинна бути проінформована компетентним органом та/або іншою відповідною особою про те, що підтоплення є природним процесом, який інтенсифікується під впливом техногенних факторів, викликаних діяльністю

людини. Таким чином, громадськість повинна усвідомити, що є проблема підтоплення, яку частково можна вирішувати шляхом обмеження потреб у воді в промисловій, сільськогосподарській, туристичної та приватних цілях, в зонах, схильних до ризику підтоплення. Інформація про обмеження при будівництві нових об'єктів повинна бути легко доступна. Інформація про оцінки ризику повинна бути легко зрозуміла, наприклад, чіткі карти підтоплення із застосуванням ГІС-технологій, однозначні актуальні прогнози і т.д.

Громадськість слід заохочувати до прийняття власних заходів (наприклад, гідроізоляція приватних будинків) щодо запобігання підтоплень, вона повинна бути інформована про те, як діяти у разі підтоплення. Кожен, хто може постраждати від наслідків підтоплення, повинен також застосовувати, якщо можливо, власні запобіжні заходи. З цією метою, відповідна інформація і системи прогнозування повинні бути встановлені компетентними органами влади. Важливо, щоб прогнози підтоплення і пов'язана з ними інформація були легко доступні і в реальному часі висвітлювалися в ЗМІ. Влада повинна гарантувати, що інформація про попередження підтоплення та плани захисту є прозорою і легко доступною для громадськості. Інформація повинна поширюватися вільно і активно, не тільки за запитом [28].

– Доцільність басейнового підходу. Європейський досвід показав, що ефективні заходи щодо попередження підтоплення та захисту від нього, повинні бути прийняті на рівні басейну річки і що необхідно брати до уваги взаємозалежність і взаємодію ефектів окремих заходів, здійснюваних уздовж водних об'єктів. Це абсолютно необхідно, для поліпшення прогнозування, планування заходів щодо захисту від підтоплення та кризис-менеджменту в річковому басейні. Важливо враховувати всі фактори впливу в річковому басейні перетинаючи регіональні межі країни. Це досяжно у співпраці з відповідними організаціями у сфері гідрології та метеорології, контролю річки, планування природоохоронних заходів, цивільного захисту і т.д. [28].

– Доцільність регіонального підходу. Мала ефективність інженерних заходів може бути пов'язана з тим, що інженерна підготовка незручних до забудови земель здійснюється точково (локально). Частка міських земель в загальному балансі територій неухильно зростає у зв'язку з процесом урбанізації, що відбувається у всьому світі. Міста ростуть вшир навіть тоді, коли є територіальні ресурси всередині існуючих кордонів. Це пов'язано з бажанням освоїти найбільш цінні в містобудівному відношенні території, залишаючи в резерві незручні землі, освоєння яких вимагає спеціальних інженерних рішень і великих капітальних витрат. Усередині міської межі залишалися значні вільні площі, а межі міста розширювалися за рахунок освоєння периферії. У межах територій деяких міст не використовується понад 25% площі, яка, при відповідній інженерній підготовці, могла б бути забудована.

У нових генеральних планах міст в більшості випадків передбачається освоєння незручних земель за рахунок здійснення комплексу заходів з інженерної підготовки територій, серед яких провідне місце займає дренаж [23, 27]. Для запобігання зміни водного балансу підземних вод планування та проектування інженерних заходів має бути регіональним. Наприклад, при плануванні будівництва одного об'єкту повинні бути запропоновані захисні інженерні заходи, що охоплюють цілий квартал. Іншими словами, масштаб захисних заходів від підтоплення повинен перевищувати масштаби будівництва нового об'єкту. Підхід до підготовки ділянки для нового будівельного об'єкту повинен бути комплексним – включати організаційні та інженерні заходи. Підтоплення в місті може мати не тільки регіональний і локальний, а часто і об'єктний (точковий) характер. Якщо регіональний тип підтоплення у багатьох випадках може бути врахований при проведенні інженерних вишукувань, проектуванні та подальшої експлуатації забудованої території, то локальний (об'єктний) тип підтоплення практично непередбачуваний. Він пов'язаний, головним чином, з помилками при будівництві та незадовільною експлуатацією будівлі, зовнішніх водогінних

комунікацій і порушенням умов дренажу поверхневого стоку на прилеглий ділянці території. Локальний тип підтоплення має в містах вельми широке, хоча і дискретне поширення. Причини виникнення близької до надзвичайної ситуації з підвищеним рівнем ґрунтових вод на урбанізованих територіях варто шукати не в інженерному блоці, а в управлінському, коли рішення про зміну виду землекористування або господарської діяльності в уразливій зоні розвантаження ґрунтових вод приймаються без розробки комплексного прогнозу або на основі помилкових висновків.

– Доцільність комплексного підходу. Для попередження підтоплень в населених пунктах України, захисту і пом'якшення їх наслідків, сприятливо поєднання структурних заходів, профілактичних заходів та оперативних заходів. Будівельні норми і законодавство, повинні регулювати належне використання земель, господарську діяльність у заплавах річок, планування захисних споруд, пом'якшення наслідків підтоплень, системи раннього попередження, оцінку ризиків і готовності населення, як діяти при підтопленні. У деяких випадках навіть переселення населення з підтоплених областей може бути доцільним.

Розробка попередньої стратегії захисту від підтоплення повинна включати відповідно оцінку пов'язаних з цим витрат, оцінку технічних можливостей, оцінка впливу на навколишнє середовище, на соціальне середовище, на стійкій основі, розглядаючи річковий басейн інтегрованим в довгостроковий прогноз і оцінку на 50 або 100 років. Існує потреба в міждисциплінарній співпраці на всіх державних та місцевих рівнях для координації політики щодо охорони навколишнього середовища, планування землекористування, сільського господарства, транспорту та міського розвитку, і координація управління ризиками: оцінка ризику, планування пом'якшення наслідків та впровадження найкращої практики щодо запобігання підтоплення. Таким чином, комплексний підхід, необхідний у масштабі річкового басейну. Комплексний підхід сприятиме кращому розумінню фізики процесів, і кращій підтримці прийняття рішень. Ефективна

співпраця між органами державної влади, екологічними організаціями, підприємствами з регулювання води та інших зацікавлених сторін можлива шляхом створення місцевої Комісії води. Це більше, ніж необхідно для регіональної координації та реалізації цілісного підходу [28].

– Зміна парадигми управління підтопленням полягає в комплексному підході до вирішення проблеми попередження підтоплення та поступовій реалізації кожного етапу та заходу. Кардинальні зміни передбачають:

– доцільність переходу від оборонних дій від небезпечного підвищення РГВ до управління ризиком підтоплення;

– прогнозування та картографування не тільки частих та масштабних подій, а й усіх можливих. Рівень захисту та необхідні заходи для різних масштабів підтоплення;

– реалізацію стратегії в області підтоплення, що повинна бути узгоджена на місцевому – регіональному – національному – міжнародному рівні в межах басейну річки;

– пріоритет повинен віддаватися інтегрованим заходам з управління водними ресурсами для всієї площі водозбору, а не на управління підтопленням як таким;

– прогнозування зміни РГВ і розвитку підтоплення може бути ефективним в поєднанні з іншими превентивними заходами. Традиційні і нові технології і методи прогнозування підтоплення повинні співіснувати і використовуватися для взаємної перевірки та порівняння отриманих даних, для більш ефективного та точного прогнозу;

– використання історичної інформації і досвіду, проведення ретроспективного аналізу буде сприяти складанню більш чітких обґрунтованих прогнозів;

– система своєчасного і надійного попередження та прогнозування підтоплення, залежна від басейнових даних, а не секторальних є одним з основних умов для поліпшення захисту від підтоплення. Це означає, що необхідно узгодити технічні процедури для гідрологічних та

метеорологічних прогнозів, порядок застосування, зберігання та обміну даними між сусідніми країнами [28, 80].

### 5.5 Висновки до п'ятого розділу

Типова схема взаємодії органів управління та завдань попередження і ліквідації наслідків підтоплення дозволяє наочно представити важливість і значимість управлінських попереджувальних заходів в боротьбі з підтопленням.

На відміну від існуючих, запропонований алгоритм дозволяє враховувати окрім підтоплених територій, території з ризиком підтоплення, що значно підвищує рівень екологічної безпеки об'єктів довкілля.

Розроблена програма заходів для попередження підтоплення мегаполісів забезпечує:

- раціональне використання водних ресурсів шляхом обґрунтування та скорочення нормативів водоспоживання, підвищення надійності водопостачання та водовідведення, та використання відкачуваної підземної води в технічних цілях у промисловості і в міському господарстві;
- запобігання негативного впливу на навколишнє середовище від процесу підтоплення. Запобігання розвитку процесу підтоплення, пом'якшення наслідків впливу підтоплення на довкілля, прогнозування зміни рівня ґрунтових вод за допомогою математичного моделювання та застосування попереджувальних заходів на етапі планування будівельної діяльності;
- оптимізацію статей водного балансу на основі результатів математичного моделювання зміни рівня ґрунтових вод та методів варіативної статистики [28].

В запропонованій математичній моделі в подальшому можливе врахування додаткових факторів впливу на РГВ: види покриттів і типи рослинності, від яких залежить фактор транспірації.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи, розв'язані важливі науково-практичні завдання прогнозування підтоплення міських територій і розробки заходів з контролю стану рівнів ґрунтових вод та попередження підтоплення, що дозволяє підвищити рівень екологічної безпеки у великих містах України. У процесі виконання дисертаційних досліджень, були отримані наступні наукові і прикладні результати:

1. Доведено, що при відсутності дренажів у великому місті в умовах значного додаткового живлення і наявності непроникних покриттів рівні ґрунтових вод зростають і суттєвим чинником їх стабілізації на підвищених позначках є евапотранспірація, зміну якої з глибиною необхідно враховувати при прогнозах змін рівнів ґрунтових вод.

2. Досліджено зміну РГВ у великому місті за період з 2004 по 2017 рр. на прикладі м. Харків, що дозволило отримати дані для створення адекватної математичної моделі цього процесу. Результати дослідження показали, що РГВ є практично незмінними на досліджуваних територіях завдяки евапотранспірації, що компенсує підвищення РГВ на незабудованих ділянках території великого міста.

3. Розроблено математичну модель зміни РГВ, з уперше визначеними крайовими умовами, що враховує вплив штучних покриттів поверхні ґрунту і евапотранспірацію.

4. Зроблений прогноз максимально високих РГВ для м. Харків на створеній моделі у великому місті на прикладі м. Харків запропонований, як підґрунтя для прийняття управлінських рішень щодо попередження і ліквідації підтоплення.

5. Для забезпечення екологічної безпеки автодоріг, що зазнають підтоплення ґрунтовими водами, уперше науково обґрунтовано параметри протифільтраційної завіси, що включають коефіцієнт фільтрації, довжину та глибину завіси.



6. Удосконалено теоретико-методологічні основи управління РГВ, які відображені в проекті комплексних заходів з попередження розвитку підтоплення міських територій, що включають типову схему взаємодії органів управління та завдань попередження і ліквідації наслідків підтоплення, алгоритм дій у ході проведення моніторингу за РГВ на підтоплених і потенційно підтоплених територіях та Проект комплексу заходів з попередження розвитку підтоплення міської території великих міст України з урахуванням європейського досвіду.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яковлев Е. А., Сляднев В. А., Юркова Н. А. Влияние закрытия шахт на активизацию процессов подтопления и усложнение эколого-геологического состояния территории. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 42–44.
2. Яковлев Е. О., Трофимчук О. М., Закорчевна Н. Б., Госк Е. Регіональне підтоплення міст та селищ України як фактор її національної безпеки. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 12–23.
3. Яцик А. В. Підтоплення земель в Україні. *Вопр. хімії і хім. технології*. 2002. № 5. С. 292–295.
4. Швец В. Я., Кушнер С. Г. Борьба с подтоплением и экономия энергоресурсов. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 72–78.
5. Чебанов А. Ю. Поиск эффективных решений проблемы подтопления городов. *Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов»*. 2002. № 47. С. 133–138.
6. Телима С. В. Вплив Каховського водосховища, магістральних каналів та зрошувальних систем. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2006. Вип. 6. С. 14–32.
7. Телима С. В. Дослідження розвитку процесів підтоплення в період 1980 - 2004 років. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2006. Вип. 7. С. 127–140.
8. Телима С. В. Прогнозування процесів підтоплення міських територій та промислово-міських агломерацій в сучасних умовах. Методи і методика досліджень. *Містобудування та терит. планув.* 2005. Вип. 22. С. 367–378.

9. Телима С. В. Про стан проблеми підтоплення ґрунтовими водами території України. *Містобудування та терит. планує.* 2004. Вип. 17. С. 326–333.
10. Стрижельчик Г. Г. Концептуальные вопросы борьбы с подтоплением городских территорий. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності.* 2003. № 6. С. 24–27.
11. Вижва С. А., Онищук І. І., Цюпа І. В. Моніторинг процесів підтоплення на території національного комплексу «Експоцентр України» *Геоінформатика.* 2010. № 1. С. 66–71.
12. Абрамов И. Б., Чомко Ф. В., Кошуба А. И., Чомко Д. Ф., Куденко О.Д., Козлова О.Д. Значение геологического строения зоны активного водообмена при экологической оценке воздействия техногенных фильтрационных потерь на подземные воды городских территорий (на примере г.Харькова). *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н.Каразіна.* 2009. №864. С. 6–21.
13. Абрамов І. Б. Формування підземних вод промислово-міських агломерацій (науково-методичні аспекти екологічної безпеки): Автореф. дис. д-ра техн. наук. Нац. акад. природоохорон. та курорт. буд-ва. Сімферополь, 2007. 36 с.
14. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А., Яковлев В. В., Анищенко Л. Я., Писня Л. А. Оценка адекватности предлагаемой математической модели прогноза на фактических данных мониторинга уровня грунтовых вод в центральной части г. Харьков. *Scientific Journal «ScienceRise».* №11(40). 2017. С. 43–47.
15. Абрамов С. К., Дзекцер Е. С., Гавшина З. П. Факторы подтопления территорий промышленных предприятий и меры борьбы с ними. *Промышленное строительство.* 1971. № 1. С. 21–32.
16. Дзекцер Е. С., Гавшина З. П. Схематизация техногенных изменений водного режима на территориях промпредприятий. *Промышленное строительство»* № 11. М. 1973. С. 18–25.

17. Дзекцер Е. С. Техногенные гидрогеологические системы в организации подземной гидросферы застроенной территории. *Подземные воды и эволюция литосферы*. 1985. С. 375–380.
18. Муфтахов А. Ж. Гидродинамические основы прогноза подтопления промплощадок и фильтрационные расчеты защитного дренажа в сложных гидрогеологических условиях: Автореф. дис. докт. техн. наук. Москва, 1975. 44с.
19. Сологаев В. И. Прогнозы и моделирование подтопления и дренирования в городском строительстве. Докт. дис. Омск, 2003. 352 с.
20. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А. Изменение уровня грунтовых вод в городской экосистеме г. Харькова. *Вісник НТУ«ХПИ»*. 2016. № 4 (1176). С.132–137.
21. Серикова Е. Н. Математическое моделирование повышения уровня грунтовых вод под воздействием дополнительной инфильтрации. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 6/4. С. 26–33.
22. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А. Изучение особенностей изменения уровня грунтовых вод с помощью математического моделирования. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 3/4. С. 31–35.
23. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А., Яковлев В. В. Математическое моделирование изменения уровней грунтовых вод в городах с учетом ведущих режимообразующих факторов. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2014. № 4 (51). С. 182–191.
24. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical Model of Dangerous Changing the Groundwater Level in Ukrainian Industrial Cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. 2015. Vol. 1, № 2. P. 86–90.
25. Серикова Е. Н., Свиренко Л. П. Снижение норм водопотребления как фактор энергосбережения. *Всеукраинский научно-технический журнал "Энергосбережение"*. 2010. № 3. С. 31–32.

26. Серикова Е. Н., Яковлев В. В. Дополнительная инфильтрация в подземные воды на территории крупных городов (на примере г. Харькова). *Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов»*. 2011. С. 344–348.
27. Серикова Е. Н., Яковлев В. В. Роль управленческих методов в предотвращении подтопления городов. *Науковий вісник будівництва*. 2012. № 68. С. 382–387.
28. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City. *International Journal of Development Research*. 2015. Vol. 5, Issue 12. P. 6236–6240.
29. Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Яковлев В. В. Додаткове живлення підземних вод у великих містах України на прикладі міста Харкова. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. 2016. № 130. С. 13–18.
30. Барщевський М. Є., Гриневецький В. Т., Сорокіна Л. Ю. Підтоплення земель в Україні: проблема та шляхи її подолання. *Укр. геогр. журн.* 2003. № 2. С. 3–8.
31. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”. 2012. 105 с.
32. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. Затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України від 19 червня 1996 р. 1996. №173. 72с.
33. Wilkinson W. B. Proceedings of the Institute of Civil Engineers., Part I Rising groundwater levels and geotechnical consequences. *Informal discussion, Ground Engineering Group and Water Engineering Group*. 1984. № 76. P. 791–793.

34. Management of the London Basin Chalk Aquifer. Status Report 2015 of Environment Agency. 58 p.
35. Environment Agency, Management of the London Basin Chalk Aquifer. Status Report 2018 of Environment Agency. 38 p.
36. Wilkinson B. Rising groundwater levels in london and possible effects on engineering structures. *Hydrogeology in the Service of Man, Mémoires of the 18th Congress of the International Association of Hydrogeologists*, Cambridge, 1985. P. 145–157.
37. Bob M., Rahman N., Elamin A., Taher S. Rising Groundwater Levels Problem in Urban Areas: A Case Study from the Central Area of Madinah City. *Saudi Arabia. Arabian Journal for Science and Engineering*. 2016. Volume 41, Issue 4, 1461–1472.
38. Чистикова А. В., Выставная Ю. Ю., Яковлев В. В., Мацюк С. А., Горшкова Е. А. К вопросу качества воды родников, формирующихся в городской экосистеме г. Харькова. *Науковий вісник будівництва*. 2015. № 2 (80). С. 147–152.
39. Постанова КМУ №160 "Про затвердження Комплексної програми ліквідації наслідків підтоплення територій в містах і селищах України" від 15 лютого 2002 року. Київ. 2002. 45 с.
40. Постанова ВРУ №545 «Про затвердження Державної програми запобігання і боротьби з підтопленням земель» від 29.04.2004. Київ. 38с.
41. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”. 2014. Вип. XI. 101 с.
42. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2011 році. Міністерство екології та природних ресурсів України. 2012. 258 с.

43. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2012 році. Міністерство екології та природних ресурсів України. Київ – 2013. – 384с.

44. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”. 2018. Вип. XV. 98 с.

45. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. Міністерство охорони навколишнього природного середовища України. Державна геологічна служба. 2009. Вип. IV. 111с.

46. Сай В. Підтоплення земель України. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2011. вип. I (21). С. 285–288.

47. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. Державна служба геології та надр України. Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”. 2010. Вип. VII. 45 с.

48. Эмих В. Н. Дренаж в потоке грунтовых вод через завесу. *Прикл. механика и техн. физика*. 2002. Т. 43. № 4. С. 106–114.

49. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. Державна служба геології та надр України. Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”. 2011. 88 с.

50. Голуб В. П. Умови та фактори техногенного підтоплення. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2005. № 1. С. 29–32.

51. Разметаев С. В., Чебанов О. Ю. Про стратегію та головні завдання вирішення проблеми підтоплення населених територій в Україні. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 5–11.
52. Аверьянов С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод. Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. *Известия АН СССР*. 1956. С. 85–47.
53. Веригин Н. Н. О гравитационно-упругом режиме фильтрации. *Труды ин-та «ВОДГЕО». Инженерная гидрогеология*. 1969. вып. 22. С.6–17.
54. Кремез В. С. Актуальные вопросы моделирования подтопления территорий и других опасных процессов, связанных с изменением режима грунтовых вод. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 56–64.
55. Лущик А. В., Шwirло М. І., Яковлев Є. О. Основні зміни інженерно-геологічних умов у межах підтоплених територій та напрями їх довивчення *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 28–32.
56. Лущик А. В., Шwirло М. І., Лущик А. А., Парак Т. Ю. Основні положення щодо удосконалення системи моніторингу при підтопленні територій. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 33–37.
57. Кремез В. С., Буц Ю. В., Цимбал В. А. Моделирование процесса подтопления территорий в зоне влияния водосховищ. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2012. № 1–2. С. 128–130.
58. Миляева Е. В., Махатков И. Д. Ермолов Ю. В., Кирпотин С. Н. Развитие подтоплений вдоль насыпных дорог в условиях лесотундры Западной Сибири. *Вестник Томского государственного университета*. 2012. № 365. С. 206–219.
59. Mordvintsev K., Alwahab Y. A. Evaluation of the Effectiveness of the Creation of Antifiltration Curtains in Hydroelectric Power Plant in Syria.



*Proceedings of International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT*. 2017. P. 634–639.

60. Bruce D. A., Dreese T. L., Heenan D. M. Concrete walls and grout curtains in the twenty-first century: the concept of composite cut-offs for seepage control. *USSD 2008 Conference*. (Portland, OR, April 28-May 2 2008.). Portland, OR, 2008. P. 35.

61. Serikova E., Strelnikova E., Pisia L. Mathematical modeling of curtain grouting parameters for the roadways flooding prevention. *Журнал "Технологический аудит и резервы производства"*. 2018. №5. С. 25–30.

62. Яковлев Є. О. Про необхідність зниження екологічних та соціальноекономічних загроз регіонального підтоплення земель в Україні. *Матеріали 5-ої науково-практичної конференції*. Київ, 2007. С. 5–14.

63. Рудаков В. К. Методы прогнозных расчетов влияния орошения на режим грунтовых вод. Вопросы гидрогеологических прогнозов в связи с ирригацией земель и водоснабжением. *Труды Днепропетровского государственного университета*. 1970. Вып. 3. 123–127.

64. Золотарев Н. В. Моделирование подтопления и дренирования мелиорируемых ландшафтов методом электронных таблиц с целью прогнозирования их состояния: автореф. дис. Омск, 2013. 22 с.

65. Владыко А. Б. Технология создания противofiltrационных завес струями высокого давления. Монографія. Національний гірничий університет. Днепропетровск. 2010. 86 с.

66. Гребенюк Т. В., Адаменко А. В. Розробка методу очищення ґрунтових вод від забруднення в місцях накопичення твердих побутових відходів. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2015. № 27. С. 119–123.

67. Менейлюк А. І., Петровський А. Ф., Борисов О. О., Кирилюк С. В. Влаштування протифільтраційного екрана для захисту підземного простору від підтоплення. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2018. Т.29 (68) Ч. 3. № 1. С. 176–180.

68. Ларцева І. І., Петруняк М. В. Дослідження вононепроникності ґрунтоцементу як матеріалу протифільтраційних завіс. *Будівельні конструкції*. 2016. № 83(2). С. 21–27.
69. Свіренко Л. П., Спирін О. І., Яковлев В. В. Підземні води урбанізованих територій та пов'язані з ними проблеми. *Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб.* 2002. Вып. 36. С. 186–190.
70. Iakovlev V. V., Svirenko L. P., Chebanov G. U., Spirin O. I. Risig Graund Water Levels in North-Easter Ukraine: Hazardous Trends in Urban Areas. *Current Problems of Hydro Geology in Urban Areas, Urban Agglomerates Industrial Centers, Kluwer Academic Publishes*. 2002. P. 222–241.
71. Подтопление застраиваемых территорий грунтовыми водами и их инженерная защита. *Сб. тезисов докладов к Всесоюзной научно-технической конференции в Ташкенте*. 1978.
72. Кошляков О. Є., Диняк О. В. Досвід застосування геоінформаційних технологій для вивчення процесу підтоплення територій долин малих річок м. Києва. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльн.* 2007. № 1. С. 25–29.
73. Сай В. М. Дослідження процесу підтоплення земель з врахуванням соціально-економічних збитків. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2011. № 75. С. 127–132.
74. Вижва С., Цюпа І. Динаміка процесів підтоплення центральної частини національного комплексу «Експоцентр України» за даними геофізичних досліджень. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка*. 2010. № 49. С. 32–35.
75. Дубняк С. С. Еколого-гідроморфологічний аналіз проблем підтоплення земель у зоні впливу дніпровських водосховищ. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2007. № 256. С. 293–307.
76. Волошкіна О. С., Березницька Ю. О., Яковлев Є. О. Дослідження рівнів впливу регіонального підтоплення на якість поверхневих водних ресурсів. *Екологічна безпека та природокористування*. 2008. № 1. С. 61–70.

77. Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration. 2006.

78. Macdonald D. M. J., Dixon A., Newell A. J., Hallaways A. Groundwater flooding within an urbanised flood plain. *Journal of Flood Risk Management*. 2012. № 5. 68–80.

79. Macdonald D. M. J., Bloomfield J. B., Hughes A., MacDonald A., Adams B., and McKenzie A. Improving the understanding of the risk from groundwater flooding in the UK. *European Conference on Flood Risk Management*. (Oxford, UK, 30 Sept –2 Oct 2008). The Netherlands, 2008. P. 1–10.

80. Биченок М. М., Іванюта С. П., Яковлєв Є. О. Про вплив екзогенних геологічних процесів на рівень техногенних ризиків життєдіяльності. *Збірник наукових праць Українського державного геологорозвідального інституту*. 2006. №1. С. 85– 91.

81. Клевцов А. А., Горелик С. И. Использование дистанционных методов для локализации зон подтоплений на примере Харьковской области. *Вісник Харківського національного університету*. 2013. № 1049. С. 21–23.

82. Таранов В. Г., Салтовец Е. А. О проблеме подтопления в г. Харькове и области. *Ком. хоз-во городов*. 2003. С. 135–142.

83. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу. Державна служба геології та надр України. Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”. 2013. 98 с.

84. Яковлєв В. В. Питне водопостачання міст на основі окремого використання підземних вод (на прикладі міста Харкова). Автореф. дис. канд. техн. наук., Харків. 1999. 18 с.

85. Ємельянова І. Геолого-економічна оцінка експлуатаційних запасів технічних підземних вод пліоценового водоносного горизонту на водозаборі

ПФ «Галс» (м. Харків), станом на 01 січня 2009р. (родовище «Дубки»). 2009. 32 с.

86. Sierikova O., Yakovev V. Additional infiltration to underground waters of big cities territory (on example Kharkiv region). *Proceedings of International Conference on Natural Sciences and Technologies. Linnaeus ECO-TECH'10.* (Kalmar, 22–24 November 2010). Kalmar, Sweden, 2010. P. 693–695.

87. Кулініч В. І. Проблеми підтоплення і затоплення в Харківській області у зв'язку з екологічним станом річок та низькою дренаваністю територій. *Коммунальное хозяйство городов.* 2002. № 38. С. 140–142.

88. Макаровський Є. Л., Гриценко А. В. Екологічний атлас Харківської області. 2005. С.11.

89. Best practices on Flood prevention, protection and mitigation. Document. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the assessment and management of floods of 25.09.2003. P. 29.

90. ДБН В.1.1-25:2009 Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення. Київ. 2010. Чинні від 2011–01–01. 91 с.

91. СНиП 2.06.15 – 85. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Стройиздат. Москва. 1986. 20 с.

92. Бабіченко В. Я. Нагальні проблеми ліквідації підтоплення ґрунтовими водами територій міст і селищ міського типу України. *Матеріали доп. і повідомл. міжнар. конф.* (14-16 жовт. 1998 р., м. Харків. 1998). Харків. 1998. Ч. 1. С. 106.

93. Бабіченко В. Я., Чебанов О. Ю., Никитенко В. Й., Чуніхін В. Г. Сучасні проблеми підтоплення міст України, шляхи їх вирішення. *Вісник Українського Будинку економічних та науково-технічних знань.* 1998. №9. С. 3–12.

94. Гиринский Н. К. Некоторые вопросы подземных вод. *Гидрогеология и инженерная геология.* 1947. №9. С.3–100.

95. Выставная Ю. Ю. Эколого-экономическая оценка воздействия потерь из систем водопроводно-канализационного хозяйства на

гидрогеологическую среду урбанизированных территорий. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльн.* 2003. № 6. С. 88–90.

96. Зекцер И. С., Каримова О. А., Бужуоли О., Буччи М. Региональная оценка уязвимости пресных подземных вод: методологические аспекты и практическое применение. *Водные ресурсы.* 2004. Том 31. № 6. С. 645–650.

97. Гольдберг В. М. Природные и техногенные факторы защищенности грунтовых вод. *Бюл. МОИП.* 1983. № 2. С. 103–110.

98. Горбань Н. С., Хват В. М., Хват А. В. Зменшення негативного впливу дощових стічних вод на водні об'єкти шляхом контролю та управління накопиченням твердих часток на поверхні міських водозборів. *Екологія и промисленность.* 2010. № 4. С. 57–63.

99. Гранько О. В. Напружено-деформований стан тривало навантажених лесових основ за умови їх підтоплення: автореф. дис. канд. техн. наук. Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю.Кондратюка. Полтава, 2008. 20 с.

100. Гриневский С. О. Оценка инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод на основе геогидрологических моделей: автореферат дис. доктора геолого-минералогических наук. Москва, 2012. 46 с.

101. Задорожний А. І. Дослідження динаміки та прогнозування процесів підтоплення сільськогосподарських угідь в системі еколого-меліоративного моніторингу. Автореф. дис. канд. техн. наук. Київ, 2006. 18 с.

102. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП. Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”. 2015. 55 с.

103. Постанова ВРУ №609–IV Про Рекомендації парламентських слухань "Підтоплення земель в Україні: проблема та шляхи подолання" від 6.03.2003. Київ. 2003. 32 с.

104. Ромащенко М. І., Савчук Д. П. Підтоплення земель в Україні. *Вісн. аграр. науки.* 2001. № 8. С. 54–59.

105. Ромащенко М. І. Савчук Д. П. Шляхи модернізації систем захисту територій від підтоплення в умовах зрошення. *Вісн. аграр. науки*. 2000. № 4. С. 59–64.
106. Тюремина В. Г., Фесенко А. В., Черкасов В. А., Шаталин С. Н. Методические подходы при выполнении пространственного прогноза подтопления на территории юга Украины. *Зб. наук. пр. Укр. держ. геологорозв. ін-ту*. 2006. № 1. С. 24–28.
107. Юрченко В. А. Некоторые микробиологические аспекты проблемы подтопления территорий. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльн.* 2003. № 6. С. 52–55.
108. Serikova O. Svirenko L. Changeover to European Standards of Portable Water Consumption as a Factor of Power Saving. *Proceedings of VI International Yourth Environmental Forum "Ecobaltica`2006"*. (St. Petersburg, 27–29 June 2006). St. Petersburg, Russia, 2006. P. 169–170.
109. Серикова Е. Н., Яковлев В. В. Использование математического моделирования для оптимизации баланса подземных вод. *Materiály X mezinárodní vědecko-praktická konference «Moderní vymoženosti vědy – 2014»*. (Praha, 27.01. –05.02.2014). Díl 30. Praha, 2014. P. 18–20.
110. Климчик О. М., Пінкіна Т. В., Пінкін А. А. Впровадження системи інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2018. №4 (45). С. 36–40.
111. Ковальчук В. Особливості методології системного управління водним режимом територій для захисту від підтоплення. Індуктивне моделювання складних систем, випуск 6, 2014. С. 97–106.

## ДОДАТОК А

## Список публікацій здобувача

***Наукові праці, в яких опубліковані наукові результати дисертації***

1. Серикова Е. Н., Яковлев В. В. Дополнительная инфильтрация в подземные воды на территории крупных городов (на примере г. Харькова). *Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов»*. 2011. № 97 С. 344–348. *Здобувач оцінив вплив додаткової інфільтрації на підйом РГВ і їх якісний склад.*

2. Серикова Е. Н., Яковлев В. В. Роль управленческих методов в предотвращении подтопления городов. *Научный вестник строительства*. 2012. № 68. С. 382–387. *Здобувач обґрунтував можливість застосування організаційних та управлінських заходів щодо зменшення втрат води та підвищення культури водокористування на забудованих територіях.*

3. Серикова Е. Н. Математическое моделирование повышения уровня грунтовых вод под воздействием дополнительной инфильтрации. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 6/4. С. 26–33. *Здобувач розробив математичну модель зміни РГВ під впливом додаткової інфільтрації.*

4. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А. Изучение особенностей изменения уровня грунтовых вод с помощью математического моделирования. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 3/4. С. 31–35. *Здобувач розробив математичну модель, яка враховує додаткову інфільтрацію в ґрунтові води, кількість опадів, що інфільтруються в ґрунтові води, транспірацію, випаровування та водовідбір з підземних вод.*

5. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А., Яковлев В. В. Математическое моделирование изменения уровней грунтовых вод в городах с учетом ведущих режимобразующих факторов. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2014. № 4 (51). С. 182–191. *Здобувач визначив*

величину зміни РГВ під впливом техногенних факторів і вирішив завдання оптимізації статей водного балансу ґрунтових вод.

6. Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Яковлев В. В. Додаткове живлення підземних вод у великих містах України на прикладі міста Харкова. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. 2016. № 130. С. 13–18. *Здобувач дослідив причини інтенсивного розвитку підтоплення у великих містах України та визначив яким чином розвиток міст впливає на режим підземних вод.*

7. Серікова Е. Н., Стрельникова Е. А. Изменение уровня грунтовых вод в городской экосистеме г. Харькова. *Вісник НТУ«ХП»*. 2016. № 4 (1176). С.132–137. *Здобувач зібрав та проаналізував об'єктивні дані про рівні ґрунтових вод за останні 10 років в м. Харків для об'єктивного прогнозу розвитку процесу підтоплення в місті.*

8. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical Model of Dangerous Changing the Groundwater Level in Ukrainian Industrial Cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. 2015. Vol. 1, № 2. P. 86–90. *Здобувач виконав прогнозування зміни рівня ґрунтових вод для м. Харків.*

9. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City. *International Journal of Development Research*. 2015. Vol. 5, Issue 12. P. 6236–6240. *Здобувач розробив превентивні заходи для стабілізації рівня ґрунтових вод великих міст України із залученням Європейського досвіду в боротьбі з підтопленням.*

10. Серікова Е. Н., Стрельникова Е. А., Яковлев В. В., Анищенко Л. Я., Писня Л. А. Оценка адекватности предлагаемой математической модели прогноза на фактических данных мониторинга уровня грунтовых вод в центральной части г. Харькова. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2017. № 11 (40). С. 43–47. *Здобувач оцінив адекватність математичної моделі на фактичних даних моніторингу рівня ґрунтових вод, що визначила тісний*



кореляційний зв'язок розрахункових та реальних моніторингових значень рівнів ґрунтових вод.

11. Серикова Е. Н., Свиренко Л. П. Снижение норм водопотребления как фактор энергосбережения. *Всеукраинский научно-технический журнал "Энергосбережение"*. 2010. № 3. С. 31–32. Здобувач провів пілотні соціологічні дослідження по виявленню реальних обсягів споживання води мешканцями міста Харкова.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Серикова Е. Н., Свиренко Л. П. Снижение норм водопотребления в г. Харькове: перспективы и оценка последствий. *II International Water Forum Aqua Ukraine*. (Київ, 21–23 сентября 2004). Київ, 2004. С. 315–316.

2. Serikova O., Chaliy D. Environmental and Economic Aspects of Water Metering Implementation (Kharkiv Region). *12<sup>th</sup> International Student Conference "Economics for Ecology"*. (Sumy, 3–7 May 2006). Sumy, Ukraine, 2006. P. 177–178.

3. Serikova O. Svirenko L. Changeover to European Standards of Portable Water Consumption as a Factor of Power Saving. *Proceedings of VI International Yourth Environmental Forum "Ecobaltica`2006"*. (St. Petersburg, 27–29 June 2006). St. Petersburg, Russia, 2006. P. 169–170.

4. Sierikova O., Yakovlev V. Quality Indexes of Ground Water at Zmiev District of Kharkiv Region. *Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Technologies for Waste and Wastewater Treatment. Eco-Tech 2007*. (Kalmar, 26–28 November). Kalmar, Sweden, 2007. P. 449–455.

5. Sierikova O., Yakovlev V. Water Supply Crisis and Reservation of Drinking Water: a Tactical and Strategic Approach. *Proceedings of International Yourth Science Environmental Forum "Ecobaltica`2008"*. (St. Petersburg, 26–28 June 2008) St. Petersburg, Russia, 2008. P. 285–289.

6. Серикова Е. Н., Свиренко Л.П. Прогноз изменения уровня ґрунтовых вод на городских территориях на основе ретроспективного анализа ландшафтных условий. *Материалы 2й всеукраинской студенческой*

научно-технической конференции «Устойчивое развитие городов». (Харьков, 12–14 мая 2009). Ч.2. Харьков, 2009. С. 138–139.

7. Sierikova O., Yakovev V. Additional infiltration to underground waters of big cities territory (on example Kharkiv region). *Proceedings of International Conference on Natural Sciences and Technologies. Linnaeus ECO-TECH'10*. (Kalmar, 22–24 November 2010). Kalmar, Sweden, 2010. P. 693–695.

8. Sierikova O., Yakovlev V. Using a Mathematical Model to Evaluate the Economic and Environmental Damage Caused by the Flooding. *Матеріали XIX Міжнародної наукової конференції «Економіка для екології»*. (Суми, 30 квітня – 3 травня 2013). Суми, 2013. С.164–166.

9. Серикова Е. Н. Математическое моделирование повышения уровня грунтовых вод под воздействием дополнительной инфильтрации. *Сборник статей VII Международной научно-технической конференции молодых специалистов, аспирантов и студентов «Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем»* (Пенза, 28–31 мая 2013). Россия, г. Пенза, 2013. С. 199–202.

10. Серикова Е. Н., Яковлев В. В. Использование математического моделирования для оптимизации баланса подземных вод. *Materiály X mezinárodní vědecko-praktická konference «Moderní vývoje vědy – 2014»*. (Praha, 27.01. –05.02.2014). Díl 30. Praha, 2014. P. 18–20.

11. Serikova E., Strelnikova E. Critical Changing Groundwater Level in Ukrainian Industrial Cities. *Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції «Економіка для екології»*. (Суми, 6–7 травня 2015). Суми, 2015. С. 87–90.

12. Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А. Математическое моделирование изменения уровня грунтовых вод под воздействием техногенных факторов городской среды *Збірник тез доповідей XIII міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки»*. (Кременчук, 6–7 жовтня 2015). м. Кременчук, 2015. С.58.

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Відбір та втрати води КП «Харківводоканал» згідно звіту 2-ТП водгосп, тис м<sup>3</sup>/рік [26, 84]

Джерело централізованого водопостачання	2006			2010			2014			2018		
	Забір води	Втрати		Забір води	Втрати		Забір води	Втрати		Забір води	Втрати	
	тис м <sup>3</sup> /рік	тис м <sup>3</sup> /рік	%	тис м <sup>3</sup> /рік	тис м <sup>3</sup> /рік	%	тис м <sup>3</sup> /рік	тис м <sup>3</sup> /рік	%	тис м <sup>3</sup> /рік	тис м <sup>3</sup> /рік	%
Краснопавлівське вдсх.	59269,6	23195,6	39,14	58566,0	23466,1	40,07	53652,0	17190,8	32,04	42855,7	23799,5	55,5
р. Сіверський Донець	197165,4	78146,0	39,63	180280,5	73005,3	40,50	168763,6	54293,2	32,17	112367,6	70635,0	62,9
Артезіанські свердловини	3438,1	1409,3	40,99	3394,0	1431,1	42,17	3717,9	1191,7	32,05	1985,5	1366,4	68,8
Σ	259873,1	102750,9		242240,5	97902,5		226133,5	72675,7		157208,8	95800,9	

## ДОДАТОК В

Розрахунок коефіцієнтів  $E^1$ ,  $E^2$ ,  $E^3$  за допомогою програмного пакету Maple

> restart;

> pi := 3.1415926

$\pi := 3.1415926$

>

> L := 1000; l1 := 500; l2 := 600; kz1 := 1.5; om0 := 0.118; k1  
:= 1.0; hcp := 0.5; h1 :=  $\frac{om0 \cdot hcp}{kz1}$ ; b1 :=  $\frac{h1}{2} + hcp$ ; h2  
:= h1 + b1;

$L := 1000.$

$l1 := 500.$

$l2 := 600.$

$kz1 := 1.5$

$om0 := 0.118$

$k1 := 1.0$

$hcp := 0.5$

$h1 := 0.03933333333.$

$b1 := 0.5196666666$

$h2 := 0.5590000000$

>

$k := 1; A1 := \frac{2 \cdot h1 \cdot L}{\pi \cdot k} \sin\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right) + b1 \cdot \frac{2 \cdot L}{\pi \cdot k} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right) - \sin\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right) + h2 \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot k}{2}\right) - \sin\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right) + k1 \cdot \frac{2 \cdot L}{\pi \cdot k} \cdot \left(-\cos\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right) - \frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L} \sin\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right) + \cos\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right) + \frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L} \sin\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right);$

$k := 1$

$$A1 := 128.9068580$$

$$> E1 := \frac{2 \cdot (h1 \cdot L + A1)}{hcp \cdot L \cdot \sinh\left(\frac{\pi \cdot k}{2 \cdot L}\right)};$$

$$E1 := 428.419960;$$

$$\begin{aligned} > k := 2; A2 := & \frac{2 \cdot h1 \cdot L}{\pi \cdot k} \sin\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right) + b1 \cdot \frac{2 \cdot L}{\pi \cdot k} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right. \\ & \left. - \sin\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right) + h2 \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot k}{2}\right) - \sin\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right) + k1 \\ & \cdot \frac{2 \cdot L}{\pi \cdot k} \left(-\cos\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right) - \frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L} \sin\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right. \\ & \left. + \cos\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right) + \frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L} \sin\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right); \end{aligned}$$

$$k := 2$$

$$A2 := 5.74945293$$

$$> E2 := \frac{2 \cdot (h1 \cdot L + A2)}{hcp \cdot L \cdot \sinh\left(\frac{\pi \cdot k}{2 \cdot L}\right)};$$

$$E2 := 57.40109280$$

$$\begin{aligned} > k := 3; A3 := & \frac{2 \cdot h1 \cdot L}{\pi \cdot k} \sin\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right) + b1 \cdot \frac{2 \cdot L}{\pi \cdot k} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right. \\ & \left. - \sin\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right) + h2 \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot k}{2}\right) - \sin\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right) + k1 \\ & \cdot \frac{2 \cdot L}{\pi \cdot k} \left(-\cos\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right) - \frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L} \sin\left(\frac{\pi \cdot l1 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right. \\ & \left. + \cos\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right) + \frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L} \sin\left(\frac{\pi \cdot l2 \cdot k}{2 \cdot L}\right)\right); \end{aligned}$$

$$k := 3$$

$$A3 := -4.9015445;$$

$$> E3 := \frac{2 \cdot (h1 \cdot L + A3)}{hcp \cdot L \cdot \sinh\left(\frac{\pi \cdot k}{2 \cdot L}\right)};$$

$$E3 := 29.2265023;$$

>

$$l := 1000$$

&gt;

$$l := 1000; fl := EI \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot l} \cdot x\right) \cdot \sinh\left(\frac{\pi}{2 \cdot l} \cdot y\right) + E2 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot l} \cdot x\right) \cdot \sinh\left(\frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot l} \cdot y\right) + E3 \cdot \cos\left(\frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot l} \cdot x\right) \cdot \sinh\left(\frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot l} \cdot y\right);$$

$$l := 1000$$

$$fl := 428.4199602 \cos(0.001570796300x) \sinh(0.001570796300y) \\ + 57.40109280 \cos(0.003141592600x) \sinh(0.003141592600y) \\ + 29.22650238 \cos(0.004712388900x) \sinh(0.004712388900y)$$

> *plot3d*((**10**), x = -1000..1000, y = 0..0.2)

## ДОДАТОК Г

## Моніторингові дані зміни рівня ґрунтових вод

Таблиця Г.1 – Зведена таблиця зміни рівня ґрунтових вод в точках контролю на ділянці злиття річок Харків і Лопань

№ точки	Адреса точки, географ. коорд.	Геоморфологічне розташування	Геологічна будова	Встан. рівень ґрунтової води		Рік вишукувань
				Глибина від поверхні, м	Абс.відм.,м	
1.	пров. Банний, 2. 9 пов. буд., 49.9866 ПШ, 36.2276 СхД	р. Харків	дрібнозернисті світло-сірі і жовтувато-сірі піски, місцями мулисті, з тонкими прошарками мулу, з лінзами супісків і глин	4,2–5,0	98,6–99	1965
2.	пров. Банний, 1. житл. буд., 49.9866 ПШ, 36.2273 СхД	р. Харків	насипний будівельний і небудівельний ґрунт	2,7–3,5	103,08–104,31	1978, 1987
3.	пров. Банний. Дит. садок 49.9862 ПШ, 36.2283 СхД	р. Харків	насипний будівельний і небудівельний ґрунт	2,7–3,5	100,8–100,0	1978
3а.	пров. Банний, 2. Житл.буд. 49.9862 СШ, 36.2283 СхД	р. Харків	насипний будівельний і небудівельний ґрунт	2,5–3,2	103,55–104,13	1987
4.	пров. Банний. Інж.мережі 49.9874 ПШ, 36.2270 СхД	р. Лопань	алювіальні відкладення, глина	1,1–3,53	99,70–103,76	1978
5.	пл. Павлівська, 2 (Р. Люксембург), 49.9865 ПШ, 36.2284 СхД	Злиття р. Лопань і р. Харків	четвертинні алювіальні піски, покриті з поверхні насипними ґрунтами потужністю до 4,8 м, що підстилаються палеогеновими глинами, залягають на глибині близько 12 м	2,6–3,3	100,05–100,40	2001
6.	монумент «Незалежності України» на пл. Павлівська 49.9871 ПШ, 36.2281 СхД	р. Лопань	четвертинні піски і заторфовані суглинки, перекриті з поверхні насипними ґрунтами і підстилаються глинами палеогенового віку	2,9–3,0	101,4	2001
7.	пл. Павлівська	Злиття	неоген-четвертинні піщано-глинисті відкладення,	1,9–2,1	103,15–103,8	2006

	(Р.Люксембург), 1/3. ЦУМ, 49.9879 ПШ, 36.2295 СхД	р.Лопань і р.Харків	підстилаються палеогеновими глинами і перекриті з поверхні насипними суглинними ґрунтами з включенням будівельного сміття			
8.	початок пл.Сергіївської (Пролетарська) 49.9876 ПШ, 36.2281 СхД	р.Лопань	четвертинні піски і палеогенові глини, насипні ґрунти	2,30– 4,30	100,0–102,32	1993
9.	вул.Університетська/ Павлівська пл. 49.9876 ПШ, 36.2302 СхД	Злиття р.Лопань і р.Харків	четвертинні піски і палеогенові глини, перекриті з поверхні насипними ґрунтами і суглинками з домішкою рослинних залишків	1,8–2,0	104,25– 105,15	2016
10.	вул.Університетська, 31, 49.9871 ПШ, 36.2302 СхД	Злиття р.Лопань і р.Харків	четвертинні піски і палеогенові глини, перекриті з поверхні насипними ґрунтами і суглинками з домішкою рослинних залишків	1,3	103,4	2016
11.	вул.Кооперативна 1а, 49.9864 ПШ, 36.2309 СхД	р. Харків	Четвертинні алювіальні піщано-глинисті відкладення і глини Обухівської і Київської світ палеогену	0,9–1,2	103,2–103,4	2002
12.	вул.Університетська 35/2, 49.9860 ПШ, 36.2308 СхД	р. Харків	Четвертинні алювіальні піщано-глинисті відкладення і глини Обухівської і Київської світ палеогену	2,4–3,0	101,70– 102,05	1965
12а	вул.Університетська 35/2, 49.9860 ПШ, 36.2308 СхД	р. Харків	Четвертинні алювіальні піщано-глинисті відкладення і глини Обухівської і Київської світ палеогену	–	100,59– 100,63	1981
12б	вул.Університетська 35/2, 49.9860 ПШ, 36.2308 СхД	р. Харків	Четвертинні алювіальні піщано-глинисті відкладення і глини Обухівської і Київської світ палеогену	–	100,70– 101,95	1988
13.	пл. Рибна/ вул.Університетська, 49.9851 ПШ, 36.2283 СхД	р. Харків	четвертинні алювіальні відкладення і сучасні насипні ґрунти, які перекривають алювіальні відкладення шаром потужністю від 1,3 до 4,8 м	2,5–3,9	100,02– 101,00	1988



## Продовження додатку Г

Таблиця Г.2 – порівняння моніторингових даних з прогнозованими щодо зміни РГВ

№ Точки	Фактична глибина РГВ	Абс. відм. устя, м	Рік дослідження, р.	Кількість років дослідження	Фактична зміна РГВ, м	Зміна РГВ на моделі без врахування дії евапотранспірації, м	Зміна РГВ на моделі із врахуванням дії евапотранспірації, м
2	2,7–3,5	103,08	1978	38	1,4–2,2	2,08	1,25
10	1,3	103,4	2016				
1	4,2–5,0	99,7	1965	36	1,6–1,7	1,97	1,45
5	2,6–3,3	100,05	2001				
8	2,3–4,3	100,0–102,32	1993	8	-0,6–1,3*	0,44	-0,27–0,23
6	2,9–3,0	101,4	2001				
А	5,10		2004	13	-0,3*	Неможливо врахувати	-0,40*
	5,40		2017				
Б	2,37		2004	13	-0,45*	Неможливо врахувати	-0,45*
	2,82		2017				

\* - РГВ знизився.

## ДОДАТОК Д

## Типова схема взаємодії органів управління та завдань попередження і ліквідації наслідків підтоплення



Рисунок Д.1 – Типова схема взаємодії органів управління та завдань попередження і ліквідації наслідків підтоплення

## ДОДАТОК Е

Таблиця Е.1 – Проект комплексу заходів щодо забезпечення екологічної безпеки урбанізованих територій, що зазнають вплив підтоплення ґрунтовими водами

Зацікавлені сторони	Заходи з попередження підтоплення	Завдання з попередження підтоплення	Мета завдань	Пріоритетність та терміни виконання	Джерела фінансування
Підприємства з водопостачання та відведення води	Інженерні заходи	Упорядкування та підтримання в належному стані поверхневого водовідводу, розвиток дощової каналізації (Підтримка природного поверхневого стоку в межах водозбору)	Для запобігання накопичення поверхневого стоку та як наслідок локального підтоплення	Постійно	Місцевий бюджет, інвестиції
Підприємства з водопостачання та відведення води		Ремонт систем водопостачання, водовідведення та теплових мереж, ліквідація витоків (Приблизно 60% води, яка надходить до міста, потрапляє в ґрунтові води)	Для оптимізації статей водного балансу підземних вод в межах міських територій		
Підприємства з водопостачання та відведення води		Відновлення функціонування та створення нових природних дрен, дренажних систем і споруд інженерного захисту територій міст і селищ (проведення інвентаризації та обліку дренажних систем і споруд інженерного захисту від підтоплення; будівництво та реконструкція існуючих дренажних систем та споруд інженерного захисту; організація служб експлуатації інженерних споруд)	Для відводу поверхневого стоку та запобігання підвищення РГВ		
Будівельні компанії, місцеві органи влади, підприємства з водопостачання та відведення води		Проектування і будівництво супутнього дренажу на нових гілках метрополітену	Для запобігання підтопленню		

Місцеві органи влади, підприємства з водопостачання та відведення води, екологічні організації	Контроль та управління джерелами поповнення ґрунтових вод	Моніторинг джерел додаткового та природного живлення ґрунтових вод	Для запобігання підтопленню	Постійно	Місцевий бюджет, інвестиції
		Обмеження децентралізованої приватної каналізації (заборона вигрібних ям)			
		Контроль і заборона несанкціонованого та недоречного розвитку будівництва, або господарської діяльності на територіях, які схильні до підтоплення			
Місцеві органи влади, підприємства з водопостачання та відведення води, екологічні організації	Контроль за водовідбором	Надання ліцензій на водовідбір з підземних вод великим водокористувачам і пільг для підприємств, які переходять на технічне водопостачання з підземних вод	Для оптимізації статей водного балансу підземних вод міських територій	Постійно	Місцевий бюджет, інвестиції
		Відновлення водовідбору з мергельно-крейдянського горизонту комунальними водозаборами і використання відкачуваної води для потреб міста (мийка доріг і тротуарів, мийка автомобілів, заливка катків і полив рослин, у будівництві та промислових системах охолодження і теплопостачання, для пожежегасіння та багатьох інших областях)			
Місцеві органи влади, підприємства з водопостачання та відведення води	Норми водоспоживання	Облік та регулювання споживання води. Зменшення об'єму подачі питної і технічної води в м. Харків.	Для економії енерго- та водних ресурсів, для попередження виникнення підтоплення	Першочергово	Місцевий бюджет
		Перегляд норм водоспоживання з наближенням до європейських норм. Норма водокористування для м. Харків – 370 л/доб на 1 людину, що перевищує норму в країнах Західної Європи – 129-149 л/доб на 1 людину [82]			
		Підвищення культури водокористування.			

Будівельні компанії, місцеві органи влади, підприємства з водопостачання та відведення води, екологічні організації	База даних	Створення прозорої та загальнодоступної бази даних, яка включатиме дані багаторічних досліджень по кліматичним умовам, дані за обсягами водопостачання, обсягами витоків з підземних комунікацій, ретроспективні дані, прогнольні дані щодо зміни РГВ	Для об'єктивного аналізу та прогнозу зміни РГВ та розвитку підтоплення	Постійно	Місцевий бюджет
		Розробка бази даних щодо підтоплених та потенційно підтоплюваних територій м. Харків			
		Створення місцевої Комісії води для забезпечення співробітництва між органами державної влади, міськими комунальними організаціями, громадськими екологічними організаціями та іншими зацікавленими сторонами			
Будівельні компанії, місцеві органи влади, підприємства з водопостачання та відведення води, екологічні організації	Планування алгоритмів дій при аварійних ситуаціях	Планування алгоритмів дій на випадок аварійних ситуацій, що мають наслідком підтоплення	Для зменшення негативних наслідків від можливого підтоплення	Першочергово	Місцевий бюджет
		Оцінка ризиків можливих аварійних ситуацій			
Будівельні компанії, місцеві органи влади, підприємства з водопостачання та відведення води, екологічні організації	Участь громадськості в проблемі підтоплення	Вільний доступ до інформації щодо ризиків підтоплення, заходів з попередження та ліквідації наслідків підтоплення, щодо можливості застосування приватних заходів у боротьбі з підтопленням, страхування майна	Для зменшення негативних наслідків від можливого підтоплення	Постійно	Місцевий бюджет, інвестиції

## ДОДАТОК Ж

## Впровадження результатів дисертаційних досліджень

Затверджую

Проректор з наукової роботи Національного  
технічного університету «Харківський  
політехнічний інститут»

д.т.н., проф. А.П. Марченко

«26»

2018р.



## Довідка

**про впровадження у навчальний процес  
результатів дисертаційної роботи за темою «Прогнозування і  
управління рівнем ґрунтових вод для підвищення екологічної безпеки  
забудованих територій України»  
здобувача кафедри «Інженерної екології міст» Харківського  
національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова  
Серікової Олени Миколаївни**

Комісія у складі д.т.н. Ларіна О.О., к.т.н., проф. Хавіна В.Л., д.т.н., проф. Аврамова К.В., засвідчує, що результати дисертаційної роботи Серікової Олени Миколаївни «Прогнозування і управління рівнем ґрунтових вод для підвищення екологічної безпеки забудованих територій України», стосовно математичного моделювання процесів зміни рівня ґрунтових вод та підтоплення забудованих територій України, використані в учбовому процесі на кафедрі «Механіка суцільних середовищ та опір матеріалів» при викладанні спеціального курсу «Методи математичного моделювання в механіці суцільного середовища» для бакалаврів та магістрів.

Заступник директора Навчально-наукового  
інженерно-фізичного інституту  
з навчальної роботи, д.т.н.



О.О. Ларін

Зав. кафедри  
«Механіка суцільних середовищ  
та опір матеріалів»  
к.т.н., проф.



В.Л. Хавін

Заст. зав. каф. «Механіка суцільних  
середовищ та опір матеріалів»  
д.т.н., проф.



К.В. Аврамов