

*Р.Г. Савенко, д.т.н., професор
Ю.Л. Винников, д.т.н., професор, Р.О. Повзык, магістр
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВІДВАЛІВ ГІРНИЧО- ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА НА БЛИЗЬКОРОЗТАШОВАНІ СПОРУДИ

За допомогою методу скінченних елементів розглянуто плоску задачу впливу відвалу на деформацію основи під залізничну колію.

Ключові слова: відвал, насип, залізнична колія, деформація, метод скінченних елементів.

*Р.Г. Савенко, д.т.н., професор
Ю.Л. Винников, д.т.н., професор, Р.О. Повзык, магістр
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТВАЛОВ ГОРНО- ОБАГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ

С помощью метода конечных элементов рассмотрена плоская задача влияния отвала на деформацию основания под железнодорожную колею.

Ключевые слова: отвал, насыпь, железнодорожная колея, деформация, метод конечных элементов.

*R.G. Savenko, DrSc, Prof.
Y.L. Vynnykov, DrSc, Prof., R.O. Povzyk, magistr,
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

MODELLING THE INFLUENCE OF DUMPS OF MINING-PROCESSING PRODUCTION ON CONSTRUCTIONS LOCATED NEAR BY

Using the finite element method examined a plane problem of influence of dump on deformation basis for railway track.

Keywords: dump, mound, railway track, deformation, finite element method.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. Сучасний розвиток цивілізації неможливий без використання металів. За даними професора В.І. Крутова [1] при виплавлюванні 1 т заліза утворюється в середньому 1,2 т порожньої породи та 0,9 т шлаку, 1 т міді – відповідно 4,2 т порожньої породи та 30 т шлаку, а для отримання 1 т золота переробляють близько 23 млн т гірської маси. Внаслідок активних гірничо-технічних робіт на поверхні планети накопичився загальний об'єм насипних ґрунтів понад 2000 млрд м³.

Україна – один зі світових лідерів країн-виробників чорних металів, посідаючи сьоме місце за обсягом виробництва сталі й третє за експортом металопродукції [2]. Частка металургії у ВВП країни становить близько 38%, у промисловому виробництві – 27,3%, експорті – 34,2%, а в податкових платежах у всі рівні бюджетів становить 38% [3]. Тому питання, пов'язані з ефективним розвитком і використанням місць видобування і збагачення рудних копалин є важливими. Через інтенсивне використання родовищ виникають проблеми утворення відвалів відпрацьованої породи та їх впливу на споруди, що розташовані поблизу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких розглянуто можливості розв'язання проблеми. Вплив нової забудови на напружено-деформований стан (НДС) основ і фундаментів існуючих будівель і споруд у геотехніці оцінюють як інженерними [4, 5], так і чисельними (з використанням розв'язань плоских і просторових задач методом скінченних елементів (МСЕ) у нелінійній постановці [6, 7]) методами.

А от особливості оцінювання НДС основ відвалів гірничо-збагачувального виробництва мало розглядаються в сучасній геотехнічній літературі. Головна увага в них приділяється розрахунку з використанням МСЕ стійкості відвалів, зокрема: відходів вугільної промисловості – М. Fuchsschwanz [8]; відходів промисловості та вторинної сировини – I. Vanicek та M. Vanicek [9]; армованих насипів автомобільних доріг – А.А. Коршунов та ін. [10] тощо.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується зазначена стаття. Отже, проблеми впливу відвалів гірничо-збагачувального виробництва на деформації розташованих поблизу них споруд, наприклад, залізничної колії, кількісні залежності цього впливу від геометричних розмірів відвалу та геотехнічних властивостей масиву, питання вибору адекватної моделі ґрунту основи споруд і насипів є відносно новими.

Тому за **мету роботи** прийнято дослідження МСЕ в плоскій постановці впливу різних за висотою (10; 20; 30; 40; 50 м) відвалів гірничо-збагачувального виробництва на деформації основи розташованої поблизу залізничної колії, а також осідання основи самого відвалу, використовуючи достатньо апробований програмний комплекс Plaxis 2D. При цьому розрахункові параметри матеріалу самого відвалу є сенс задавати за трьома різними моделями (Мора – Кулона, еластичною й у вигляді рівномірно розподіленого навантаження).

Виклад основного матеріалу досліджень. Відвал гірничо-збагачувальної промисловості, за фактичними параметрами якого здійснено описане нижче моделювання, розташований в межах майданчика зведення комплексу крупного дрібнення №3 на ВАТ «Полтавський ГЗК» поблизу м. Комсомольськ Полтавської області. З геоморфологічної точки зору ця територія належить до лівобережної Придніпровської низовини, що входить до складу міжріччя річок Дніпро і Псел. Головними чинниками формування рельєфу району є ерозійно-аккумулятивні та еолово-делювіальні процеси. Основними геоморфологічними елементами району є річкові тераси, притерасові зниження, заболочені староріччя та озера, піщано-суглинисті підняття і притоки.



Рисунок 1 – Відвал гірських порід і залізнична колія

Техногенні форми рельєфу представлено насипами автодоріг і залізниць (рис. 1), відвалами розкривних порід, водовідвідними каналами тощо.

Інженерно-геологічні характеристики елементів майданчика зведено до табл. 1.
Рівень ґрунтових вод на ділянці становив 2,2 м від земної поверхні.

Таблиця 1 – Інженерно-геологічні характеристики елементів

Номер шару	Назва шару	Товщи-на шару, м	Питома вага ґрунту, кН/м ³	Модуль деформації Е, МПа	Питоме зчеплення ґрунту с, кПа	Кут внутр. тертя φ , °	Коефіцієнт фільтрації K_f , м/добу	Коефіцієнт Пуассона
1а	Щебінь гранітний	0.9	20.00	45	1	30	0	0.28
3	Супісок жовтий	1.1	18.50	6	11	20	0.7	0.3
4	Пісок світло-сірий	1.5	18.70	12	1	29	5	0.3
5	Пісок сірий	8.9	20.10	22	1	34	7.5	0.3
6	Пісок сірий	5.2	20.20	25	1	36	7	0.3
7а	Суглинок темно-сірий	1.1	20.00	14	29	22	0.05	0.35
9	Глина палеогенова	1.4	19.70	14	48	18	0.015	0.35
10	Суглинок темно-сірий	1.3	19.60	12	22	21	0.07	0.35
8	Пісок сірий	3.6	20.80	35	1	38	10	0.3

Чисельне розв'язання поставленої задачі отримано за програмним комплексом PLAXIS 2D, що являє собою пакет прикладних геотехнічних програм для скінченно-елементного аналізу НДС ґрунтових масивів. Для моделювання впливу відвалу на деформації основи, розташованої поблизу нього залізничної колії, використана пружно-пластична модель Мора – Кулона (Material model: Mohr – Coulomb), що включає в себе п'ять параметрів, які отримують лабораторними випробуваннями: E – модуль деформації, ν – коефіцієнт Пуассона, φ – кут внутрішнього тертя, c – питоме зчеплення, ψ – кут дилатансії. Прийняті до моделювання характеристики фізико-механічних властивостей ґрунтів представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Властивості ґрунтів і відвалу для моделювання (модель Мора – Кулона)

Модель Мора – Кулона	Відвал	Щебінь гранітний	Супісок жовтий	Пісок світло-сірий	Пісок сірий	Пісок сірий	Суглинок темно-сірий	Глина палеогенова	Суглинок темно-сірий	Пісок сірий
Параметри										
γ_{unsat} , кН/м ³	25	20	18.5	18.7	20.1	20.2	20.0	19.7	19.6	20.8
γ_{sat} , кН/м ³	25	20	18.5	18.7	20.1	20.2	20.0	19.7	19.6	20.8
k_x , м/сут	0	0	0.7	5	7.5	7	0.05	0.015	0.07	10
k_y , м/сут	0	0	0.7	5	7.5	7	0.05	0.015	0.07	10
E_{ref} , МПа	80	45	6	12	22	25	14	14	12	35
ν	0.28	0.28	0.3	0.3	0.3	0.3	0.35	0.35	0.35	35
G_{ref} , МПа	31.3	17.6	2.31	4.5	8.5	9.6	5.2	5.2	4.4	13.5
E_{oed} , МПа	102.3	57.5	8.1	16.15	29.6	33.7	22.5	22.5	19.3	47.1
c_{ref} , кПа	1	1	11	1	1	1	29	48	22	1
φ , °	45	30	20	29	34	36	22	18	21	38
ψ , °	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Використовуючи пружно-пластичну модель Мора – Кулона, було проведено п'ять циклів моделювань впливу відвалів на деформації основи, кожен з яких мав ширину 100 м, але різну висоту – від 10 до 50 м з градацією у 10 м. Схему з геометричними варіантами відвалів показано на рис. 2.

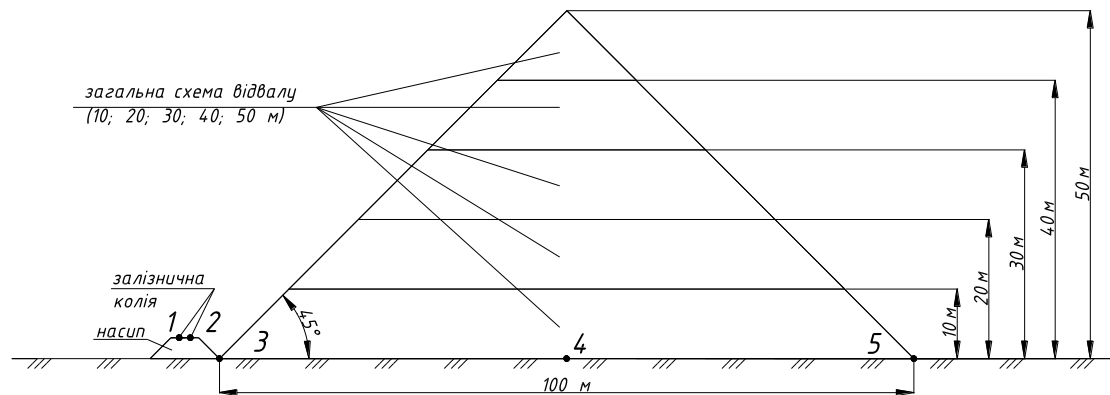


Рисунок 2 – Загальна схема варіантів геометричних параметрів відвалів

Змодельовавши 5 варіантів впливу відвалів на НДС основ у програмному комплексі Plaxis, отримано такі деформації осідання в точці 4 під центром відвалу (рис. 2): при висоті відвалу 10 м – 0,016 м; при висоті відвалу 20 м – 0,035 м (програма припинила розрахунок при навантаженні, яке становило 81,7% від повного); при висоті відвалу 30 м – 0,026 м (розрахунок припинено при навантаженні 35,2% від повного); при висоті відвалу 40 м – 0,28 м (42,5% від повного), при висоті відвалу 50 м – 0,103 м (75,3% від повного).

Відповідні вертикальні та горизонтальні деформації основи залізничної колії (точки 1 і 2) при цих п'яти варіантах показано на табл. 3. Отже, при моделюванні НДС основи відвалу з використанням пружно-пластичної моделі Мора – Кулона спостерігаються значні деформації точок залізничної колії по осі X і доволі малі по осі Y. Це відбувається переважно за рахунок деформацій матеріалу самого відвалу (рис. 3), який втрачає стійкість.

Таблиця 3 – Деформації точок залізничної колії при різній висоті відвалу (модель Мора – Кулона)

	Деформації по осі X, м	Деформації по осі Y, м
Висота відвалу - 10 м		
Точка 1	-0.11	0.0041
Точка 2	-0.108	0.0024
Висота відвалу - 20 м		
Точка 1	-0,168	0,0045
Точка 2	-0,165	0,0024
Висота відвалу - 30 м		
Точка 1	-0,071	0,011
Точка 2	-0,071	0,01
Висота відвалу - 40 м		
Точка 1	-0,107	0,012
Точка 2	-0,106	0,011
Висота відвалу - 50 м		
Точка 1	-0,293	-0,0064
Точка 2	-0,286	-0,016

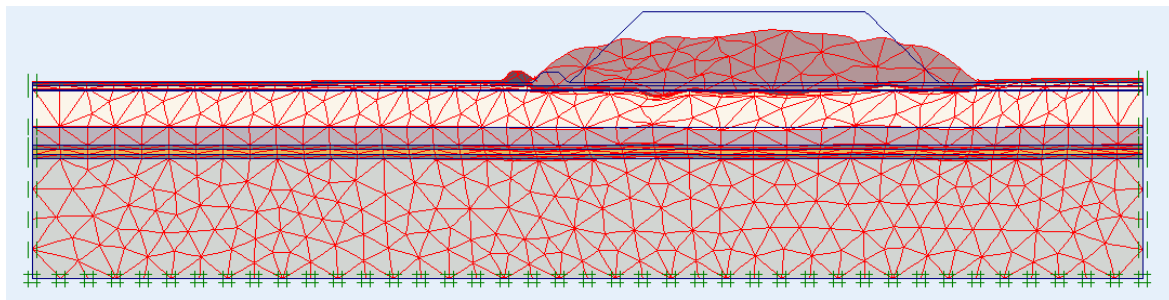


Рисунок 3 – Напружено-деформований стан відвалу (модель Мора – Кулона), висота – 20 м, масштабний коефіцієнт – 1:50

Для другого варіанта моделювання відвалу було використано еластичну модель (Material model: Linear elastic), що включає в себе два параметри, які отримують лабораторними випробуваннями: E – модуль деформації, ν – коефіцієнт Пуассона. Прийняті параметри ґрунтів подано в табл. 4.

Таблиця 4 – Фізико-механічні властивості відвалу для моделювання з використанням еластичної моделі

Еластична модель	Відвал
Параметри	
γ_{unsat} , кН/м ³	25
γ_{sat} , кН/м ³	25
k_x , м/сут	0
k_y , м/сут	0
E_{ref} , МПа	80
ν	0.28
G_{ref} , МПа	31.25
E_{oed} , МПа	102.3

Використовуючи еластичну модель, теж було проведено п'ять аналогічних циклів моделювань МСЕ впливу відвалів на НДС основ. При цьому отримано такі осідання в точці 4 під центром відвалу (рис. 2): при висоті відвалу 10 м – 0,026 м; при висоті відвалу 20 м – 0,087 м; при висоті відвалу 30 м – 0,164 м; при висоті відвалу 40 м – 0,211 м; при висоті відвалу 50 м – 0,236 м. Відповідні вертикальні та горизонтальні деформації залізничної колії (точки 1 і 2) при цих п'яти варіантах відвалів подано в табл. 5.

Таблиця 5 – Деформації точок залізничної колії при різній висоті відвалу (еластична модель)

	Деформації по осі X, м	Деформації по осі Y, м
Висота відвалу - 10 м		
Точка 1	-0,088	0.01
Точка 2	-0.088	0.01
Висота відвалу - 20 м		
Точка 1	-0,172	0,027
Точка 2	-0,17	0,028
Висота відвалу - 30 м		
Точка 1	-0,239	0,036
Точка 2	-0,234	0,034
Висота відвалу - 40 м		
Точка 1	-0,279	0,039
Точка 2	-0,275	0,036
Висота відвалу - 50 м		
Точка 1	-0,293	0,039
Точка 2	-0,288	0,036

Отже, при моделюванні НДС основи відвалу з використанням еластичної моделі, як і при застосуванні моделі Мора – Кулона спостерігаються значні деформації точок

залізничної колії за віссю X і доволі малі за віссю Y. Цей ефект теж відбувається переважно за рахунок деформації матеріалу самого відвалу (рис. 4), який втрачає стійкість.

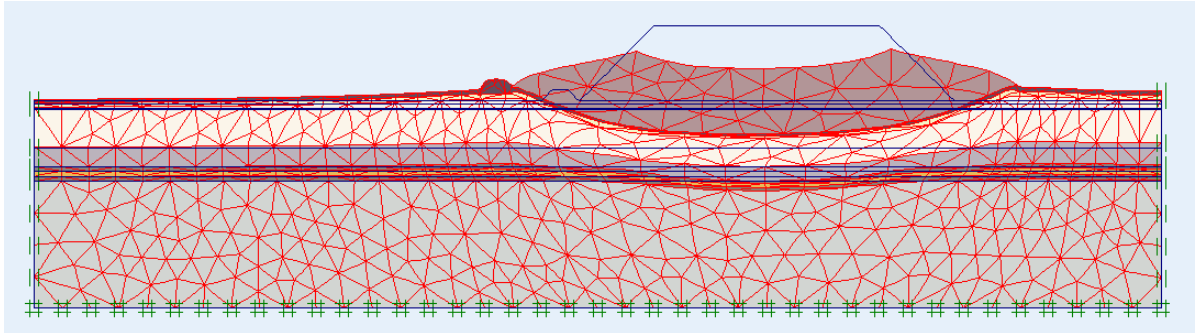


Рисунок 4 – Напружено-деформований стан відвалу (еластична модель), висота – 20 м, масштабний коефіцієнт – 1:100

Оскільки дві перші моделі не задовольняють вимогам досліджень, то провели моделювання, де відвали були задані розподіленням навантаженням. Відвал розбивався на 3 частини тіла: прямокутник і два трикутники. Навантаження під трикутниками задавалося дещо спрощено – як відношення ваги тіла на площу, яку він займає, тобто як середній тиск (при висоті відвалу 10 м – 125 кПа; при висоті відвалу 20 м – 250 кПа; при висоті відвалу 30 м – 375 кПа; при висоті відвалу 40 м – 500 кПа; при висоті відвалу 50 м – 625 кПа). Середній тиск під самим тілом відвалу висотою 10 м становив 250 кПа; 20 м – 500 кПа; 30 м – 750 кПа; 40 м – 1000 кПа; 50 м – 1250 кПа.

Змоделювавши вплив п'яти варіантів відвалів на НДС їх основ у комплексі Plaxis 2D, було отримано такі деформації осідання в точці 4 під центром відвалу (рис. 2): у відвалі висотою 10 м – 0,402 м; при 20 м – 0,793 м; при 30 м – 1,143 м; при 40 м – 1,388 м; при 50 м – 0,777 (програма припинила розрахунок при 77,1% від повного навантаження). Відповідні вертикальні та горизонтальні деформації залізничної колії (точки 1 і 2) при цих варіантах зведено до табл. 6.

Таблиця 6 – Деформації точок залізничної колії при різній висоті відвалу (рівномірно розподілене навантаження)

	Деформації по осі X, м	Деформації по осі Y, м
Висота відвалу - 10 м		
Точка 1	0	0
Точка 2	0	0
Висота відвалу - 20 м		
Точка 1	0,042	-0,137
Точка 2	0,062	-0,168
Висота відвалу - 30 м		
Точка 1	0,051	-0,174
Точка 2	0,105	-0,224
Висота відвалу - 40 м		
Точка 1	0,052	-0,21
Точка 2	0,105	-0,281
Висота відвалу - 50 м		
Точка 1	0,052	-0,192
Точка 2	0,104	-0,259

Отже, моделювання НДС основи відвалу при представленні його як рівномірно розподіленого навантаження найкраще з-поміж трьох варіантів імітує стан основи відвалу, а також деформації споруди, що розташована поряд (рис. 5). На рис. 6 показано загальні деформації масиву під відвалом.

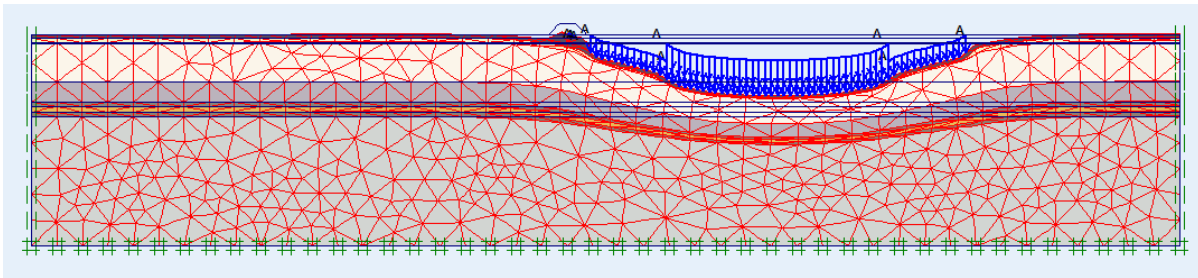


Рисунок 5 – Напружено-деформований стан відвалу (рівномірно розподілене навантаження), висота – 20 м, масштабний коефіцієнт – 1:20

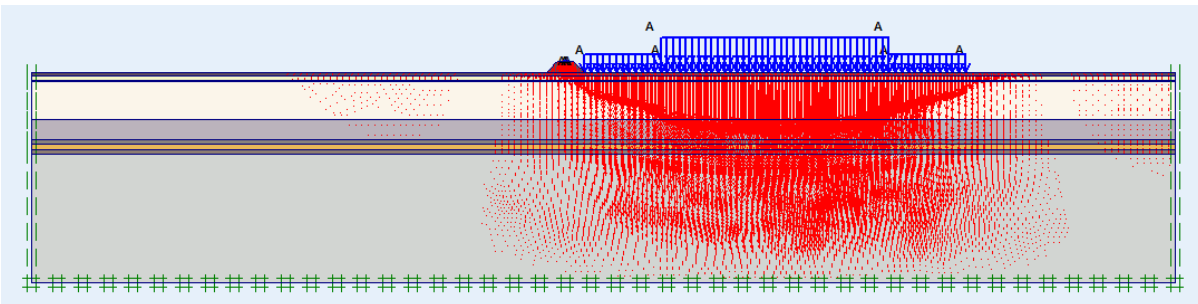


Рисунок 6 – Загальні деформації під відвалом (рівномірно розподілене навантаження), висота – 20 м

Висновки. Отже, використовуючи результати моделювання МСЕ НДС основи відвалів різних за висотою та їх вплив на близькорозташовані споруди, встановлено, що більш коректним порівняно з моделлю Мора – Кулона та еластичною моделлю є представлення матеріалу відвалу як рівномірно розподіленого навантаження.

Література

1. Крутов, В.И. Основания и фундаменты на насыпных грунтах / В.И. Крутов. – М.: Стройиздат, 1988. – 224 с.
2. Металлургия Украины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Металлургия_Украины.
3. Металургійна промисловість України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ru.wikipedia.org/wiki/Металургійна_промисловість_України.
4. Кушнер, С.Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений / С.Г. Кушнер. – Запорожье: Запорожье, 2008. – 496 с.
5. Симагин, В.Г. Проектирование и устройство фундаментов вблизи существующих сооружений в условиях плотной застройки / В.Г. Симагин. – М. : Изд-во АСВ, 2010. – 128 с.
6. Улицкий, В.М. Геотехническое сопровождение развития городов / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин. – СПб. : Георекострукция, 2010. – 552 с.
7. Фадеев, А.Б. Параметры модели упрочняющегося грунта программы «PLAXIS» / А.Б. Фадеев // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сб. статей научн.-техн. конф. – СПб. : СПбГАСУ, 2012. – С. 13 – 20.
8. Geotechnical engineering 20. View of Young European Geotechnical Engineers. – Brno: Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, 2010. – P. 316 – 321.
9. Embankment of transport infrastructure and waste or recycled materials / I. Vaniček, M. Vaniček // XIII Danube-European Conf. on Geotechnical Engineering – Ljubjana, 2007.
10. Оценка надежности армированной грунтовой насыпи автомобильной дороги с помощью пакета Plaxis 2D / Коришонов А.А., Коптяев В.В., Невзоров А.Л., Сажин А.М. // Тр. междунар. конф. «Геотехнические проблемы XXI века в строительстве зданий и сооружений», 3-5 сентября 2007 г. – Пермь: Астер, 2007. – С. 154 – 160.

Надійшла до редакції 01.10.2012
© Р.Г. Савенко, Ю.Л. Винников, Р.О. Повзик