

УДК 624.131

Є. Г. Коніков, д-р геол.-мін. наук, проф., Г. С. Педан, асист.
Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова,
Проблемна науково-дослідна лабораторія інженерної геології
узбережжя моря, водосховищ та гірських схилів (ПНДЛ-1),
Шампанський пров., 2, Одеса, 65058, Україна

ВИВЧЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ АБРАЗІЙНО-ОБВААЛЬНИХ ТА АБРАЗІЙНО- ЗСУВНИХ БЕРЕГІВ ЗА МЕТОДОМ УЗАГАЛЬНЕНИХ ЗМІННИХ

В статті розглянуті питання розроблення методики моделювання переробки абразійно-обвальних та абразійно-зсувних морських берегів північно-західної частини Чорного моря на підставі використання положень теорії геологічної подібності (методу узагальнених змінних).

Ключові слова: подібність, моделювання, абразія, морські береги, Чорне море.

Вступ

Головною проблемою інженерної геодинаміки є кількісний прогноз екзогенних і ендегенних геологічних та інженерно-геологічних процесів у просторі, в часі та по їх інтенсивності [11]. Очевидно, що надійні методи прогнозування можна створити лише на підставі дослідження закономірностей розвитку процесів.

В широкому арсеналі методів інженерної геодинаміки чинне місце посідають два традиційні інженерно-геологічні напрямки досліджень: палеогеодинамічний аналіз (історико-геологічний метод) і власно метод аналогій (порівняльний, натурних моделей). Основи цих напрямів закладені в працях Г. С. Золотарьова [5], Є. П. Ємельянової [4], Л. Б. Розовського [9]; їхнє удосконалення є першочерговою методологічною задачею інженерної геодинаміки.

Для більшості геологічних та інженерно-геологічних процесів, з огляду на їх складність, не можуть бути побудовані строгі аналітичні моделі. Це спонукає дослідників звертатися до даних натурних спостережень та експериментів. Інформація, яка міститься в натурних спостереженнях, найбільш повно використовується в методах, заснованих на аналогіях. До їх числа відноситься метод природних аналогів (натурних моделей), теоретично обґрунтований та розроблений Л. Б. Розовським і визнаний одним з найбільш перспективних. В той же час цей варіант методу має певні недоліки, що відмічали як його автор, так і інші дослідники [2, 9].

Подальший розвиток методології натурального моделювання та методу узагальнених змінних, зокрема, набув в працях науковців Одеської школи інженерів-геологів. В. М. Воскобойников із співавторами [2, 3]

розробили методику переробки берегів водосховищ та оцінки і прогнозу стійкості зсувних схилів моря. Є. Г. Коніков із співавторами [6, 8] використовували метод узагальнених змінних з метою оцінки стану і прогнозування деформування ґрунтових масивів та прогнозування стійкості зсувів на ерозійних схилах Одещини.

Мета даного дослідження — довести можливості геодинамічного аналізу і методу узагальнених змінних для прогнозування процесу абразії морських берегових схилів. Для вирішення вказаної мети були поставлені наступні задачі: 1) дослідження закономірностей розвитку берегів північно-західного Причорномор'я та факторів, що обумовлюють процес абразії; 2) обґрунтування вибору показників, які характеризують процес; 3) виведення безрозмірних комплексів параметрів (критеріїв подібності) та побудова моделей процесу розмиву берегів в узагальненому (критеріальному) вигляді.

Фактичний матеріал і методи досліджень

Фактографічну основу (комп'ютерна база даних) проведених досліджень склали спостереження за розвитком абразійних процесів на ділянках режимних стаціонарів: Лебедівському, Санжейському, Ново-Дофінівському, Григорівському, Рибаківському та Джарилгачському, розташованих в північно-західній частині узбережжя, а також Семівському, Ново-Еметівському та Мар'янівському — на узбережжях лиманів. Дослідні ділянки розташовані на берегах абразійного (Лебедівський, Джарилгачський) та абразійно-зсувного (решта) типів берегових схилів.

Довжина ділянок стаціонарних режимних спостережень коливається від 600 м до 1200 м. Період спостережень становить в середньому 25 років (з 1973 (1976) по 1997 (2000) рр). Параметри динаміки берегів, що вимірювалися включають: ширину, висоту пляжів і обсяг наносів, обсяг наносів на підводному схилі (епізодичні спостереження), лінійний відмив подошви схилу, відступання бровки абразійного схилу, обсяг відмитих порід, вертикальні та горизонтальні зсувні зміщення, рівень підземних вод.

Крім того, в комп'ютерну базу даних були включені відомості про інструментальні спостереження за клімато-гідрологічними (температура повітря, опади, випарювання, вітер тощо), гідродинамічними (рівень моря, хвилювання, сгонно-нагонні явища) параметрами, тривалість яких по різних гідрометорологічним станціям, розташованим вздовж узбережжя становить від 50 до 120 років і більше.

З метою узагальнення та обробки фактичних даних використовувались методи статистики в програмі Statistika: кроскореляційний, регресійний, спектральний та інші види аналізів. Для визначення типовості дослідних ділянок в регіональному масштабі та доведення їхньої модельності були виконані інженерно-геологічна типизація та районування узбережної зони. Для виводу безрозмірних комплексів

(критеріїв подібності) застосовувалася спеціальна комп'ютерна програма, складена співробітниками ПНДЛ-1.

Результати досліджень та їх обговорення

Важливо відмітити, що в теорії подібності та моделювання створено апарат, який дозволяє знайти критерії подібності для будь-якої області моделювання. Цей апарат зоснован на використанні двох різних засобів: 1) аналізу розмірностей величин (метод узагальнених змінних) і врахуванню умов однозначності; 2) теоретичний (логічний) аналіз явища або процесу, якщо є можливість представити явище у формі диференційного або інтегрально-диференційного рівняння. Оскільки процес абразії морських берегів складний та багатофакторний, принципово не можливо описати його за допомогою інтегрально-диференційних рівнянь [1]. Залишається тільки перший з вказаних підходів — виведення критеріїв подібності та побудова рівнянь зв'язку між ними.

У відповідності до р-теорії подібності, побудова абразійного процесу може бути зведена до пошуку закономірних зв'язків між узагальненими безрозмірними комплексами (УК). Для виводу цих комплексів використовувалася комп'ютерна програма "Degree". В якості параметрів, що характеризують процес абразії, нами було обрано розмірні величини вітрохвильової енергії, показники розмиву берегового схилу, характеристики пляжу тощо. В результаті виведення був отриманий повний список УК, який містить 56 строчок, в кожній по 6 критеріїв. Обмежені рамки статті не дозволяють привести цей список повністю.

В загальному вигляді процес хвильового руйнування абразійно-обвальних та абразійно-осипних берегів можна описати в узагальненій формі наступним рівнянням:

В якості прогнозної величини обрано значення S_i , яка входить до комплексу ПІ.

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6) = 0, \quad (1)$$

де $\Pi_1 \dots \Pi_i$ — узагальнені комплекси (критерії подібності).

Для комплексів ПІ біло обрано форму запису УК, що відповідає 49 строчці списку, оскільки в якості незалежних змінних в ній встановлено параметри H , K_p , t , тобто лінійний розмір, коефіцієнт розмиву порід в зоні хвильоприбію та час, відповідно.

$$\Pi_1 = Q/H^2; \Pi_2 = EK_p/H^3; \Pi_3 = gt^2/H; \Pi_4 = \rho H^2 K_p/t^2; \Pi_5 = q/h^2;$$

$$\Pi_6 = \gamma_v H K_p, \quad (2)$$

де Q — об'єм відмитих порід берегового схилу, H — середня зважена висота абразійного схилу, h — середня зважена висота пляжу, K_p — коефіцієнт розмиву порід [2], ρ — об'ємна маса порід при природній вологості, γ_v — питома вага води, q — об'єм наносів на пляжі, t — час, в нашому випадку прийнятий рівний одному року, E — енергія вітрохвильового впливу.

змістом він представляє собою критерій геометричної подібності та відображає форму схилу, який в процесі руйнування (в часі) може набувати вогнуту, опуклу або прямолінійну форму. УК Π_2 представляє собою критерій гідродинамічної подібності, близький за формою запису до критеріїв подібності, виведених Л. Б. Розовським [9] та В. М. Воскобойниковим [2] задля прогнозування переробки берегів водосховищ. Відмінність його полягає в тому, що до цього УК входить величина K_p , яка для окремих ділянок спостережень приймається в якості постійної, з огляду на відсутність режимних спостережень по цьому параметру у складі моніторингу. Значення параметру приймається нами за літературними даними для різних типів порід, що знаходяться в зоні хвилюприбію. Комплекс Π_3 — це відносний (безрозмірний) час, а величини, що входять до нього, будуть постійними в межах однієї ділянки-аналога і відрізняться у різних ділянок. Цей критерій використовується також при центробіжному моделюванні для перерахунку часу з моделі на природу. До складу узагальненого комплексу Π_4 входить складова, що відбиває тиск порід в підвалині схилу pH , та друга складова — питома швидкість розмиву порід $K_p H D^2$. Для кожної окремої ділянки-аналога вона теж буде постійною величиною. За фізичним сенсом Π_5 відповідає Π_x , але включення його до узагальненої формули процесу абразії в якості незалежного УК обумовлено попереднім аналізом динаміки берегів, який показав тісну й значущу залежність абразії берегового схилу від розмірів пляжу та обсягу наносів [2]. Комплекс Π_6 можна трактувати як параметр, характеризуючий стійкість порід до руйнування при визначеному гідростатичному тиску води та за умови його повного або часткового водонасичення. Його величина також приймається постійною для кожного окремого аналога. Нижче в таблиці наведені діапазони величин УК для всіх ділянок-аналогів, на яких проводилися дослідження.

Таблиця

Узагальнені безрозмірні комплекси (критерії подібності)

Формула	$\pi_1=Q/H^2$	$\pi_2=E*K/H^3$	$\pi_3=g*t^2/H$	$\pi_4=\rho*N^2*K/t^2$	$\pi_5=\gamma*N*K$	$\pi_6=q/h^2$
Діапазон величин	-0,009 – 0,326	0,028 – 4,600	0,544 – 0,705	0,493 – 2,386	0,016 – 0,092	6,601- 46,100

Q — відмив бровки кліфа ($m^3/p.m$); q — об'єм наносів на пляжі ($m^3/p.m$); E — енергія хвилювання (тис. т. с/м); H — середня висота берега (м); g — прискорення сили тяжіння (m/c^2); ρ — щільність порід в зоні хвильового впливу (t/m^3); γ — питома вага води — 1,02 т. с/м³; t — час ($3,15 \times 10^7$ с); h — середня висота пляжу (м); K_p — коефіцієнт розмиваємості ($m^3/t.c. \times m$).

Враховуючи те, що узагальнені комплекси Π_3 , Π_4 , Π_6 є постійними величинами (тобто параметричними критеріями подібності [1, 2, 10]) для кожного з природних аналогів в зв'язку із неможливістю оцінки

змін значень параметрів у часі, модель процесу розмиву берегів може бути представлена у вигляді залежності:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_5) \quad (3)$$

Відомості про параметри, що входять до вказаних комплексів, представлені у вигляді часових рядів по кожній з ділянок стаціонарних режимних спостережень. Це дає можливість використовувати багатомірний регресійний аналіз для побудови узагальненої моделі процесу абразії по кожному пересіку.

Розглянемо результати моделювання процесу абразії берегів на прикладі ділянок-аналогів "Лебедівка" та "Ново-Дофінівка".

Стаціонарні режимні спостереження проводяться на ділянці "Лебедівка" довжиною у 980 м з 1976 по 1997 роки; на ділянці розташовано 12 спостережних реперних пересіка. Ця ділянка є класичним прикладом прояву абразійно-звальних процесів.

На першому етапі досліджень з метою перевірки можливостей "роботи" моделі виду (3) було використано усереднені дані величин відмиву кліфа, висоти бровки схилу і пляжу, обсягів наносів на пляжі для всій ділянки.

Внаслідок розрахунків була отримана наступна лінійна регресійна модель:

$$\Pi_1 = 0,447 - 0,019\Pi_2 - 0,025\Pi_5 \quad (4)$$

Коефіцієнт множинної кореляції моделі дорівнює $R = 0,84$ при рівні значущості $\rho = 0,015$, що свідчить про статистичну достовірність цієї моделі. На рисунку 1 наведені хронологічні графіки значень параметру Π_1 , отриманих по рівнянню (4) та розрахованих за даними натурних спостережень. Відносна похибка модельних даних становить 9,7 — 33,4%. Хронологічні графіки спостережних величин Q_n та розрахованих за моделлю Q_p представлені на рисунку 2. Коефіцієнт кореляції між ними становить $R = 0,86$ при рівні значущості $\rho = 0,003$. Відносна похибка модельних даних дорівнює 13,6–36,9%. Аналізуючі результати наведених розрахунків, можна констатувати, що вони є доволі достовірними, враховуючі зроблені узагальнення.

Для ділянки-аналога "Ново-Дофіновка" була отримана регресійна модель у вигляді рівняння:

$$\Pi_1 = 0,0356 - 0,0026 \Pi_2 + 0,0957 \Pi_5 \quad (5)$$

Коефіцієнт множинної кореляції моделі дорівнює $R = 0,73$ при рівні значущості $\rho = 0,066$, що теж є цілком задовільним результатом. Хронологічні графіки значень параметру Π_1 , модельні та розрахункові, показані на рисунку 3. Коефіцієнт кореляції між ними дорівнює $R = 0,72$ при $\rho = 0,028$.

Слід зауважити, що певна "нестійкість" наведених моделей обумовлена відносно короткими рядами натурних спостережень. Проте ці моделі в цілому достовірно описують процес розмиву берегів абразійно-обвального та абразійно-зсувного типів.

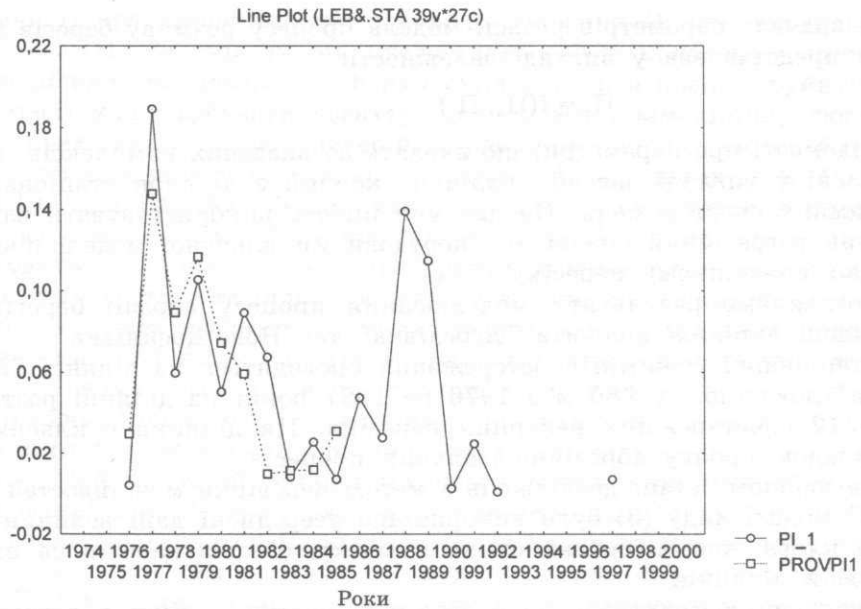


Рис. 1. Хронологічні графіки зміни у часі розрахункової (суцільна лінія) та отриманої внаслідок моделювання (штрихова лінія) величин узагальненої змінної ПІ для ділянки-аналога "Лебедівка"

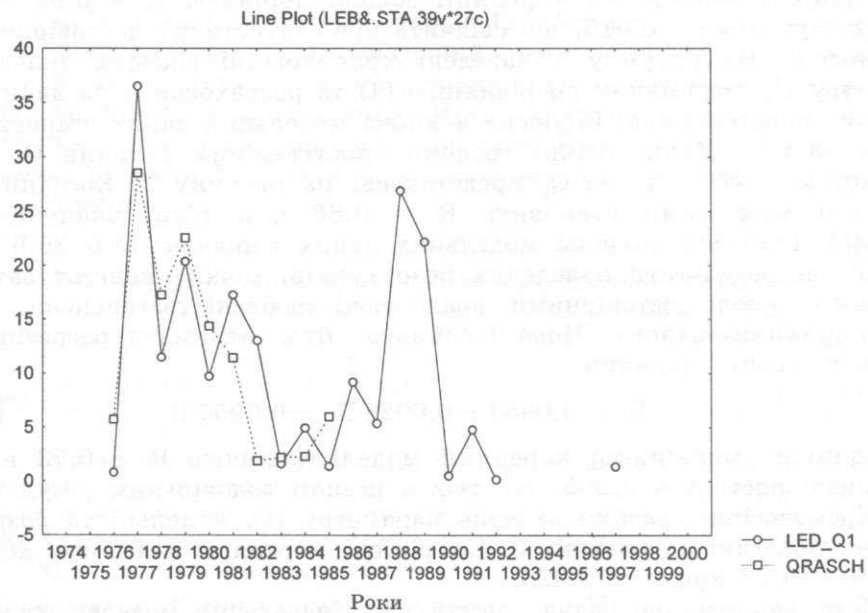
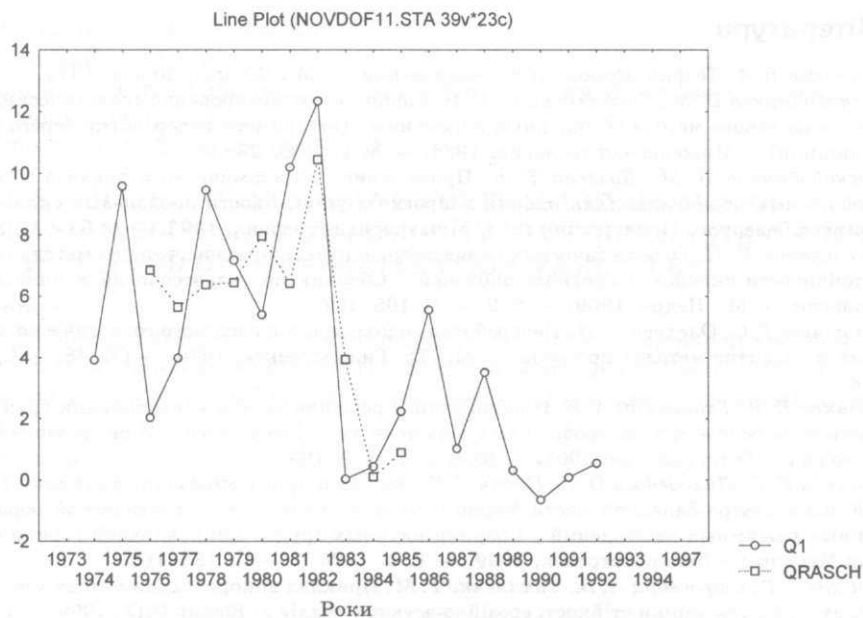


Рис. 2. Хронологічні графіки зміни у часі розрахункової (суцільна лінія) та отриманої внаслідок моделювання (штрихова лінія) величин об'єму розмиву порід кліфу Q для ділянки-аналога "Лебедівка"



Р и с. 3. Хронологічні графіки зміни у часі розрахункової (суцільна лінія) та отриманої внаслідок моделювання (штрихова лінія) величин розливу порід пліфа Q ділянки-аналога "Ново-Дофінівка"

Висновки

1. Доведена можливість використання методологічних положень теорії геологічної подібності та методу узагальнених змінних для моделювання і прогнозування розмиву морських берегів.

2. На підставі попередніх досліджень [7] визначені основні закономірності розвитку морських берегів абразійно-обвального та абразійно-зсувного типів та встановлені провідні клімато-гідрологічні фактори, що обумовлюють ці процеси. Це дозволило ґрунтовно підійти до вибору показників та параметрів, які характеризують процес розмиву берегів зазначених типів.

3. За допомогою спеціально розробленої комп'ютерної програми були виведені форми запису безрозмірних комплексів (критеріїв подібності), що пов'язують розмірні величини параметрів динаміки берегів та обумовлюючих факторів. Правильність виводу критеріїв подібності підтверджена аналізом їх фізичної змістовності та аналізом розмірностей.

4. Побудовано регресійні моделі процесу абразії берегів в узагальненому вигляді, що пов'язують між собою критерії подібності. Отримані моделі характеризуються статистичною значущістю. Вони мають великий евристичний сенс та, за умови нарощування рядів режимних спостережень, їх можна використовувати з метою прогнозування досліджуваних процесів.

Література

1. Венчиков В. А. Теория подобия и моделирования. — М.: Высшая школа, 1976. — 479 с.
2. Воскобойников В. М., Лиходедова О. Г. Изучение и прогнозирование геологических процессов на основе метода обобщенных переменных (на примере переработки берегов водохранилищ) // Инженерная геология, 1984. — № 1. — С. 23-36.
3. Воскобойников В. М., Козлова Т. В. Применение геодинамического анализа и метода обобщенных переменных для оценки и прогноза устойчивости оползневых склонов (на примере Северного Причерноморья) // Инженерная геология, 1992. — № 6. — С. 34-49.
4. Емельянова Е. П. О теоретических основах сравнительно-геологического метода оценки устойчивости склонов и прогноза оползней // Сборник по гидрогеологии и инженерной геологии. — М.: Недра, 1969. — № 2. — С. 105-127.
5. Золотарев Г. С., Олехова Л. И. Переработка водохранилищ сложного геологического строения и развитие методов прогноза. — М.: Тр. Гидропроекта, 1976. — Сб. 48. — С. 120-148.
6. Коніков Е. Г., Главацкий А. Б. Приближенное решение задачи консолидации грунтового массива на основе метода обобщенных переменных // Геозкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология, 2001. — № 3. — С. 179-183.
7. Коніков Е. Г., Лиходедова О. Г., Педан Г. С. Оценка и прогнозирование динамики береговой зоны Северо-Западной части Черного моря а основании статистической обработки данных режимных наблюдений / Сборник научных трудов Национальной горной академии Украины - Днепрпетровск, 1999. — Т. 4. — № 6. — С. 183-188.
8. Коніков Є. Г., Стровонц Л. В., Чикаленко Г. М. Приклад використання методу узагальнених змінних для оцінки стійкості ерозійно-зсувних схилів // Вісник ОДУ, 1999. — Т. 4. — Вип. 5. — 34-40.
9. Розовский Л. Б. Введение в теорию геологического подобия и моделирования (применение природных аналогов и количественных критериев подобия в геологии). — М.: Недра, 1969. — 128 с.
10. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1981. — 448 с.
11. Сергеев Е. М. Инженерная геология — наука о геологической среде // Инженерная геология, 1979. — № 1. — С. 3-19.

Є. Г. Коніков, Г. С. Педан

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова,
Проблемная научно-исследовательская лаборатория инженерной геологии побережья
моря, водохранилищ и горных склонов, Шампанский пер., 2, Одесса, 65058, Украина

ИЗУЧЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ АБРАЗИОННО-ОБВАЛЬНЫХ И АБРАЗИОННО-ОПОЛЗНЕВЫХ БЕРЕГОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОБОБЩЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Резюме

В статье обсуждаются вопросы разработки методики моделирования реформирования абразионно-обвальных и абразионно-оползневых морских берегов северо-западной части Черного моря на основе использования положений теории геологического подобия (метод обобщенных переменных).

Ключевые слова: подобие, моделирование, абразия, морские берега, Черное море.

E. G. Konikov, G. S. Pedan

Odessa National University,
Scientific-research Laboratory of Engineering Geology of Sea coast,
reservoirs and mountainous slopes,
Shampansky St., 2, Odessa, 65058, Ukraine

**THE STUDY, SIMULATION AND FORECAST DYNAMICS OF
ABRASION CLIFF AND ABRASION-LANDSLIDE COASTS ON THE
BASIS METHOD OF "GENERALIZATION VARIABLES"**

Summary

The problems of creation of the methodic for simulation development abrasion cliff and abrasion-landslide sea-coasts in the North-Western Black Sea on the basis the theorems of theory geological similarity (the method of generalization variables) were reviewed.

Key words: similarity, simulation, abrasion, sea coasts, Black Sea.