

УДК 528.88:(551.4:621.039.75)(477.41+521.16)

© **Н.В. Пазинич**, канд. геогр. наук, старш. наук. співробітник;

В.Є Філіпович, канд. геол. наук, зав. відділом;

С.А. Станкевич, д-р техн. наук, голов. наук. співробітник

ДУ “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, м. Київ

МОРФОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЛЬЄФУ ТЕРИТОРІЙ, ЩО ЗАЗНАЛИ РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ (НА ПРИКЛАДІ ЗОН ВІДЧУЖЕННЯ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЧОРНОБИЛЬ І ФУКУСІМА-1)

За методикою морфодинамічного аналізу рельєфу, відпрацьованою в зоні відчуження Чорнобильської атомної станції, на основі цифрових моделей рельєфу (ЦМР) проведено дослідження у зоні радіаційного забруднення станції Фукусіма-1. Доведено, що рельєф є визначальним фактором для формування радіаційного сліду для гірських місцевостей. В результаті досліджень на еталонних ділянках встановлена можливість визначення за даними ЦМР конкретних територій, потенційно схильних до самоочищення та сомозабруднення поверхневими денудаційними процесами, та можливість прогнозування змін меж ареалів радіаційного „сліду”.

Ключові слова: Чорнобильська АЕС, Фукусіма-1, дистанційне зондування Землі, цифрові моделі рельєфу, морфодинамічний аналіз рельєфу, каркасні елементи рельєфу, латеральні масопереміщення.

Аварії атомних електростанцій відносяться до найзначніших техногенних катастроф, які спіткали людство в останні десятиріччя. Після Чорнобильської катастрофи зона відчуження перетворилась на наймасштабнішу лабораторію вивчення наслідків радіаційного забруднення, де працювали фахівці різних країн та різних наукових напрямів. Одним з напрямів досліджень науковців було дослідження особливостей і закономірностей руху радіонуклідів у природних середовищах, до яких відносились біосфера, атмосфера, ґрунти, поверхневі, ґрунтові та підземні води тощо [1, 2, 3].

Згідно з класичними, дочорнобильськими уявленнями сполуки цезію мали міцно сорбуватися верхнім шаром ґрунту. Натомість дослідженнями у зоні відчуження Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС), повторними вимірами точок концентрації цезію у верхньому 5-сантиметровому шарі ґрунту протягом п'яти років виявлено, що у 10% точок забруднення було жорстко закріплено і залишилось без змін, на 65% точок спостерігалось

зменшення вмісту нуклідів у ґрунті, а 25% точок вимірювання характеризувалися різким підвищенням активності ґрунтів, причому при відсутності надходження цезію від джерела забруднення.

Ці дослідження встановили, що поверхнєве забруднення ґрунтів є змінною величиною. Існують ділянки, де в результаті дефляції та площинного змиву відбуваються процеси виносу радіонуклідів з частками ґрунту, а також має місце накопичення сполук цезію на механічних та геохімічних бар'єрах [4].

Потрапивши в ландшафтну сферу, продукти радіаційного забруднення починають переміщення у відповідності до законів руху речовини у природному середовищі. Одним з напрямів досліджень, які відпрацьовувались в зоні відчуження ЧАЕС, був морфодинамічний аналіз рельєфу як площини, що контролює латеральну складову речовинно-динамічного потоку. За методикою, розробленою О.М. Ласточкіним, земна поверхня розбивалася окремими лініями на грані. Лінії визначають ділянки розділу і концентрації латеральних потоків та їх напрями [5]. На основі топографічних матеріалів і матеріалів дистанційного зондування Землі (МДЗЗ), на той час, головним чином, аерофотознімків території 10-кілометрової зони відчуження ЧАЕС, укладались картографічні моделі, на яких визначалось спрямування переміщень, ділянки виносу транзиту та депонування забруднення. Особлива увага приділялась визначенню ділянок механічних бар'єрів, де радіонукліди могли накопичуватися із наступним переходом у інше природне середовище, наприклад ґрунтові води. До найбільш поширених механічних бар'єрів відносяться увігнуті перегиби рельєфу (тилові шви терас, підніжжя схилів тощо). Фрагмент карти каркасних елементів рельєфу подано на рисунку 1.

На рисунку зображено ділянку південніше ЧАЕС. Каркасна структура рельєфу представлена кільовими лініями, що з'єднують точки мінімальних екстремумів Земної поверхні, в межах цих ліній відбувається концентрація латеральних потоків. В геоморфологічному плані кільові лінії відповідають руслам балок, ярів, безрусловитим улоговинам лінійно витягнутим низинам тощо. Лінії гребеневі з'єднують точки максимальних екстремумів і відповідають вододілам, звідки починається винос речовини. Траси потенційних низхідних речовинних потоків визначають напрями площинного змиву. Також у відповідності до методики Ласточкина О.М. мало місце виділення точок „витоку”, що займали панівне положення, звідки відбувається винос речовини, і точок „стоку”, де винесена речовина накопичується. В геоморфологічному відношенні перші точки відповідають горбам, а другі – безвідпливним западинам. Крім ліній, виділено окремі яруси рельєфу; елювіальні займають найвищі гіпсометричні положення і відносяться до ділянок виносу, транселювіальні яруси є зонами транзиту речовини, а гідроморфні субгоризонтальні заплавно-терасові рівні є зонами з обмеженою латеральною міграцією або її повною відсутністю. Особливої уваги варті підніжжя схилів ярусів рельєфу або перегиби рельєфу, що є механічними бар'єрами, де відбувається злам латеральних потоків, втрата швидкості і накопичення матеріалів транспортування.

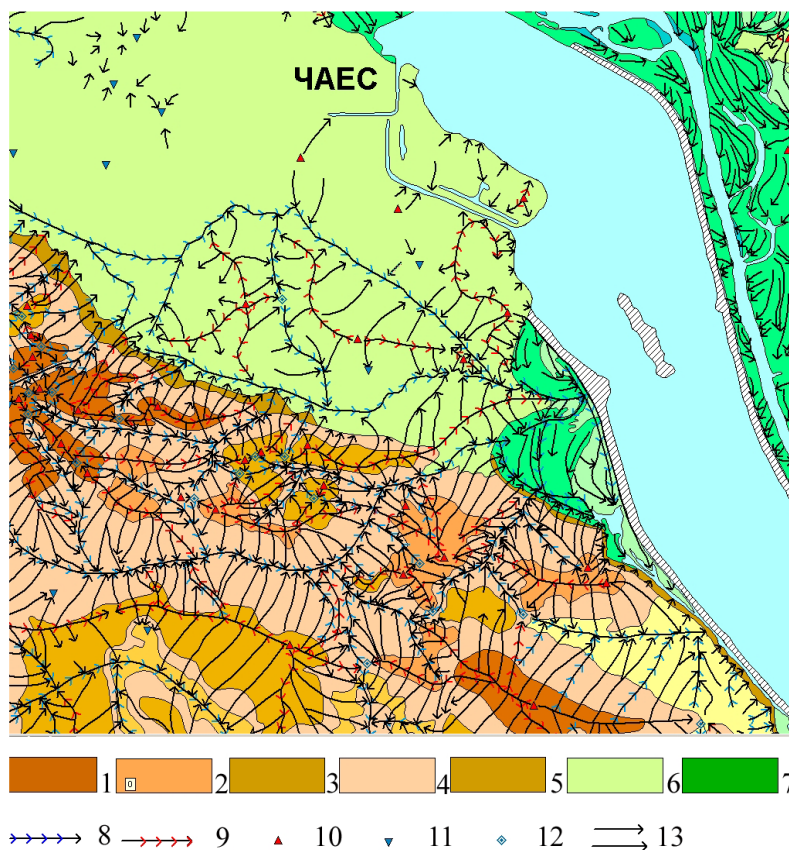


Рис. 1 – Фрагмент карти каркасних елементів рельєфу і ландшафтних ярусів 10-кілометрової зони відчуження ЧАЕС. Ландшафтні яруси: 1 – елювіально-вододільний (високий), 2 – елювіально-вододільний (середній), 3 – елювіально-вододільний (низький), 4 – транселювіальний (схилувий), 5 – транселювіальний-слабогідроморфний, 6 – елювіально-гідроморфний, 7 – гідроморфний; каркасні елементи ландшафту: 8 – кільові лінії, 9 – гребеневі лінії; характерні точки: 10 – витоку, 11 – стоку, 12 – проміжні, 13 – траси низхідних речовинних потоків

Друге попередження про величезну потенціальну загрозу, яку несуть у собі атомні електростанції, сталося 11 березня 2011 року в Японії. Первинною причиною аварії на атомній станції Фукусіма-1, на відміну від ЧАЕС, стали природні фактори. В результаті викидів в атмосферу радіонуклідів та наступного забруднення земної поверхні була визначена зона відчуження. Для регіонального дослідження особливостей випадіння радіаційних часток на Земну поверхню були використані цифрові моделі рельєфу (ЦМР) з метою виявлення ролі впливу рельєфу на процес осідання радіонуклідів. Для роботи були використані наступні дані: для побудови ЦМР матеріали радіолокаційної космічної зйомки з КА „Shuttle” [6], а дані про радіаційне забруднення отримані з відкритих джерел уряду Японії [7–8]. Результати дослідження представлені на рисунку 2.

Атомна станція Фукусіма-1 розташована на Тихоокеанському узбережжі, де абсолютні відмітки поверхні становлять в середньому 10 м. Повітряними масами продукти радіаційних викидів були переміщені у північно-західному напрямі у бік гірських масивів і сформували локалізований „слід” радіаційного забруднення. Межі „сліду” контролюються гірськими

хребтами, висота яких сягає 800 м. Гірські хребти відіграли роль механічного бар'єру, що зумовив зменшення швидкості повітряних мас і осідання речовин, що містилися у повітряному потоці. Надані дані з рисунку 2 свідчать, що на територіях зі значними відносними перевищуваннями рельєф має визначальну роль у формуванні ареалів радіаційного забруднення. Подальша доля міграції радіонуклідів після осідання на поверхню має відбуватись за законами руху речовини у ландшафтному середовищі. Зіставлення природних умов зон відчуження атомних станцій Фукусіма і Чорнобиль свідчить про те, що екзогенні процеси і пов'язані з ними латеральні переміщення мають бути значно інтенсивнішими в районі Фукусіма-1, ніж у Чорнобилі. Середньорічна кількість опадів, причому іноді дуже рясних, у префектурі Фукусіма становить 1000–1200 мм/рік, а в районі Чорнобиля не перевищує 750 мм/рік. Відносні перевищення поверхні у зоні відчуження Фукусіми сягають 800 м, а в Чорнобилі – не більше 50–55 м. Саме такі природні дані зумовлюють інтенсивність денудаційних процесів у зоні відчуження станції Фукусіма-1 і відповідно підвищену швидкість перерозподілу радіонуклідів по Земній поверхні у порівнянні з Чорнобильською зоною.

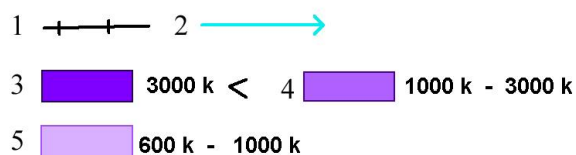
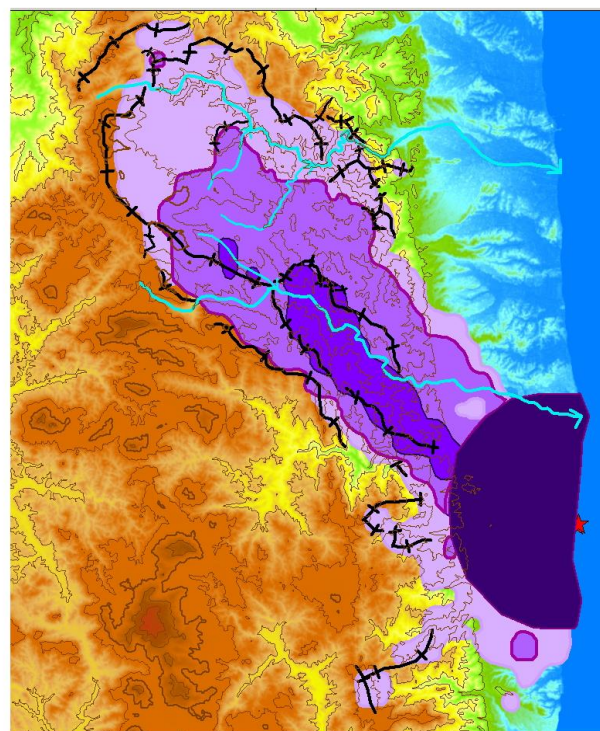


Рис. 2 – Розповсюдження ареалу радіаційного забруднення відносно вододільних гірських хребтів:
1 – вододіли, 2 – гідромережа, 3–5 – ареали радіаційного фону Cs-137 (Bq/m²)

Наступним кроком на основі ЦМР була побудова каркасної структури рельєфу зони відчуження з виділенням характерних ліній і точок, що визначають локалізацію і спрямування

латеральних речовинних потоків, на вивченні яких базується морфодинамічний аналіз. Метою детального дослідження рельєфу в межах ділянок досліджень було проведення аналізу і прогнозування перерозподілу речовини, в тому числі і радіонуклідів латеральними потоками, локалізація яких і інтенсивність контролюється рельєфом (рис. 3).

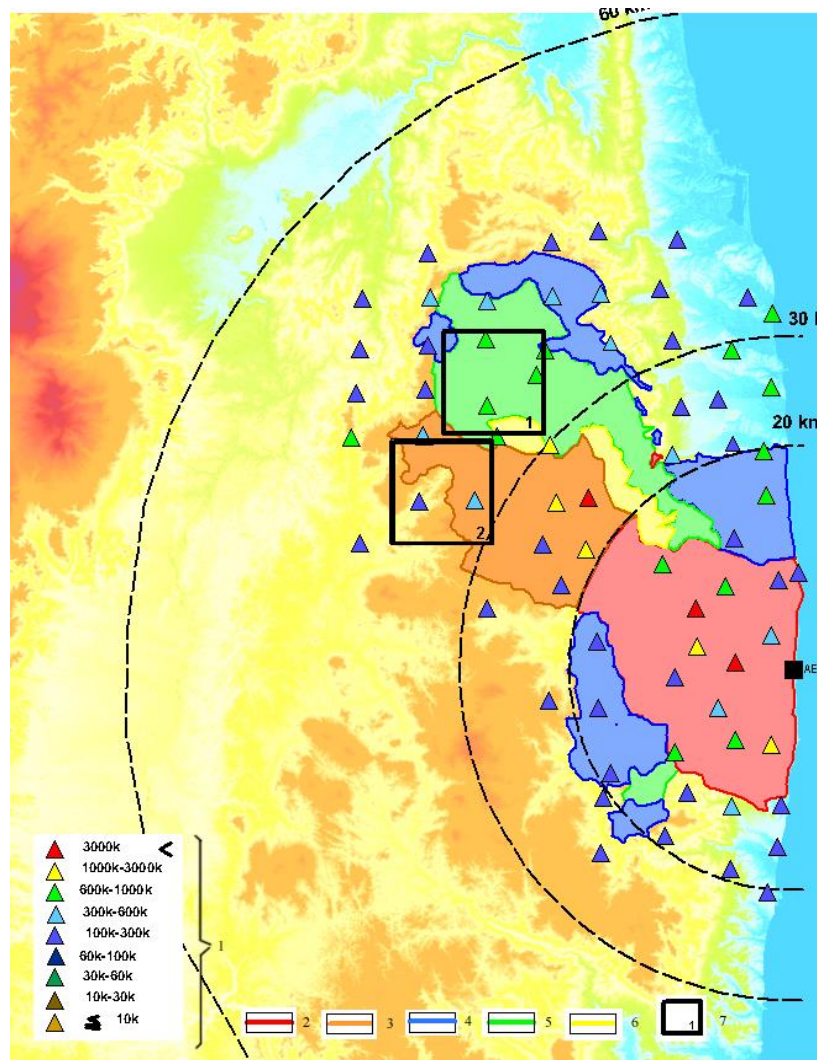


Рис. 3 – Місцезоположення детальних ділянок досліджень. 1 – радіаційні дози цезію 137 на ґрунті на 1 вересня 2012 року, концентрація цезію-137 (Bq/m^2); статус територій: 2 – заборонена зона, 3 – території примусової евакуації населення, 4 – території, на які евакуаційні замовлення готові бути зняті, 5 – області, у яких мешканцям не дозволено жити, 6 – площі, де очікується, що мешканці матимуть труднощі з поверненням протягом тривалого часу, 7 – ділянки досліджень

На рисунку 3 зображено обрані ділянки детальних досліджень у зоні відчуження станції Фукусіма. Перша знаходиться у зоні, де проживання жителям заборонено, а друга – у зоні примусової евакуації населення. Основою дослідження цих ділянок було створення картографічних моделей на основі ЦМР. Для цього в програмі Global Mapper були сформовані контури – аналоги горизонталей, задані з кроком 10 та 20 м. Проведений в межах цих двох еталонних ділянок морфологічний аналіз рельєфу полягав у розчленуванні рельєфу на окремі

грані шляхом трасування ліній через точки мінімальних і максимальних екстремумів Земної поверхні – кільові і гребеневі. Ці лінії, за фізичним змістом, є трасами концентрації і розділу латерального масопереміщення речовини.

Також проведений аналіз пластики рельєфу дозволив виділити увігнуті перегини рельєфу, що являються механічними бар'єрами, в межах яких латеральні потоки втрачають швидкість і речовина, що ними переміщується, затримується і накопичується. Особливої уваги на рисунку варті характерні точки зносу, у яких накопичується переміщений з вищих ділянок матеріал (рис. 4).

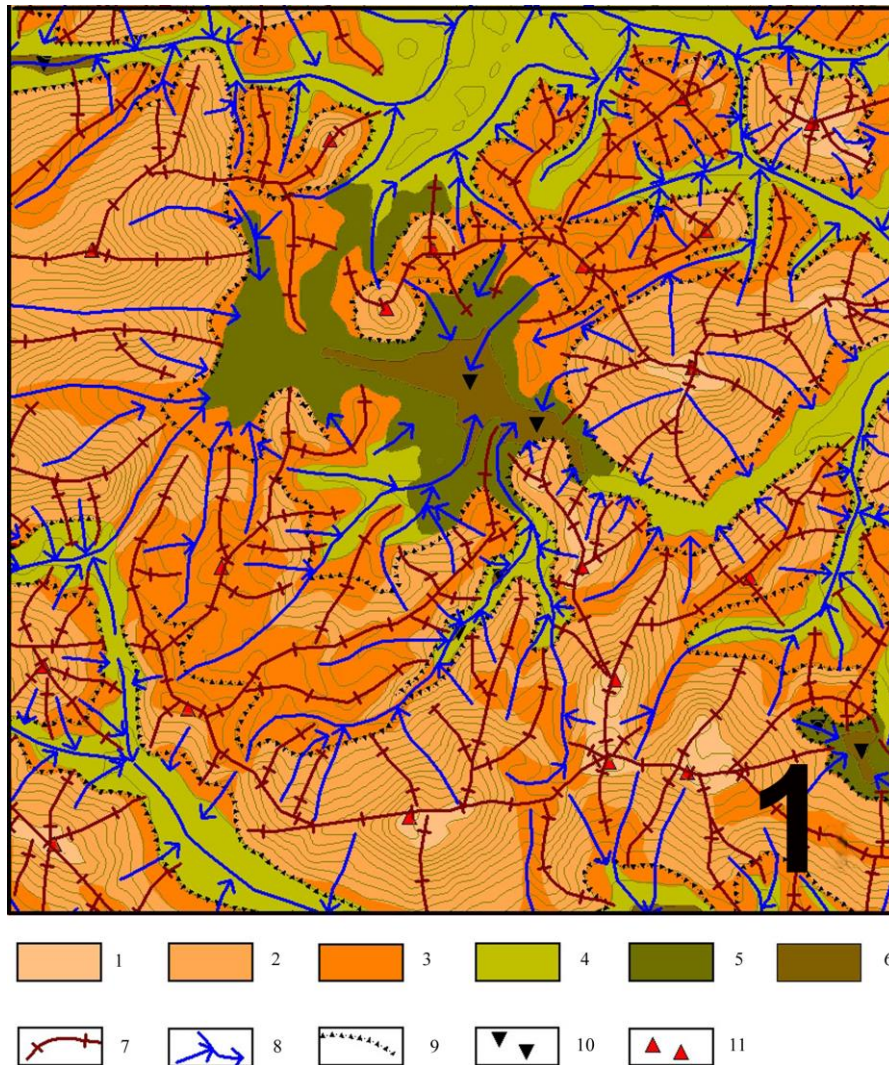


Рис. 4 – Районування території за схильністю до латеральної міграції (ділянка № 1). Ландшафтні яруси: 1 – елювіальний (слабка латеральна міграція), 2 – транселювіальний (максимальна латеральна міграція), 3 – транселювіальний (помірна латеральна міграція), 4 – трансакумулятивний (слабка латеральна міграція), 5 – трансакумулятивний (дуже слабка латеральна міграція), 6 – аккумулятивний (латеральна міграція відсутня); каркасні елементи рельєфу: 7 – гребеневі лінії розділу латеральних потоків, 8 – кільові лінії концентрації латеральних потоків, 9 – лінії увігнутих перегинів рельєфу, механічні бар'єри, 10 – точки зносу і накопичення, 11 – точки виносу

На рисунку 4 показано гірську ділянку, в центральній частині якої знаходиться безвідпливна западина. Природною особливістю ландшафтів є схильність до самоочищення. Відносна інтенсивність латеральної міграції у межах ярусів дає можливість оцінити перспективи змін первинного забруднення радіонуклідами в результаті латеральної міграції. Елювіальні яруси, що займають панівне гіпсометричне положення, є джерелами зносу і з часом мають очищуватися природним шляхом. Схиліві поверхні, транселювіальні є площинами транзиту, інтенсивність якого залежить від кутів нахилу. В межах акумулятивних ярусів в перспективі має відбуватися накопичення, депонування змитого матеріалу. Напрями кільових ліній визначають стік з оточуючих височин.

Лінії увігнутих перегинів підніжжя схилів є смугами, де з часом в результаті самоочищення вищих ландшафтних ярусів мають накопичуватися радіонукліди. У точках зносу, абсолютного гіпсометричного мінімуму в западині, накопичені продукти радіаційного забруднення згодом мають стати джерелом забруднення підземних вод.

Метою аналізу другої ділянки детальних досліджень було прогнозування змін меж ареалів забруднення в результаті латерального переміщення і наступного "розповзання" поверхневого забруднення (рис. 5).

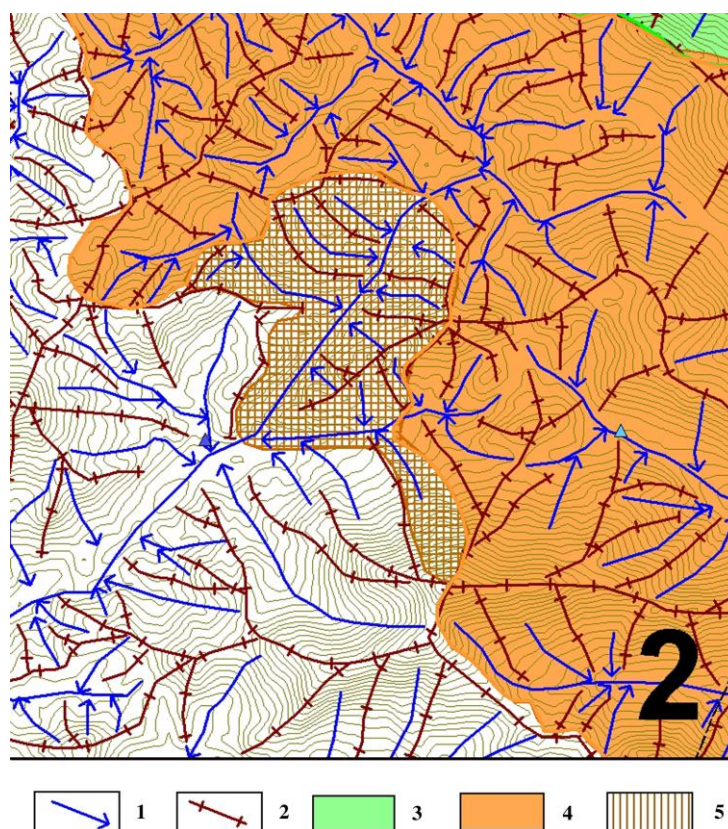


Рис. 5 – Прогнозування змін меж ареалів забруднення в результаті латеральної міграції речовини (ділянка 2). Каркасні елементи рельєфу: 1 – кільові лінії, 2 – гребеневі лінії; статус території: 3 – області радіаційного забруднення, у яких жителям не дозволено жити, 4 – області радіаційного забруднення території примусової евакуації населення, 5 – ділянка вторинного забруднення, територія можливої зміни статусу в бік погіршення

На рисунку показано визначені межі території радіаційного забруднення з примусовою евакуацією населення. Межі зони евакуації проведені по вододільних лініях, які затримали розповсюдження атморадіаційної міграції. Проте подальші ерозійно-денудаційні процеси мають спрямувати забруднені поверхневі маси ґрунту, літочастинок корінних порід та морт-мас до понижених ділянок рельєфу, що спричинить „розповзання” радіаційного забруднення. Таким чином, з часом територія, що зараз вважається цілковито безпечною, може отримати інший еколого-небезпечний статус. Відносно понижених ділянок рельєфу, “чисті” сьогодні, у межі яких спрямовані траси латеральних потоків з відносно підвищених радіаційно-забруднених височин, мають тенденцію до вторинного забруднення.

Висновки: Нарівні з іншими природними факторами рельєф відповідає за розповсюдження та подальше переміщення радіонуклідів у природному середовищі. МДДЗ, зокрема ЦМР, дають можливість у повному обсязі досліджувати морфодинамічні властивості рельєфу. Каркасна структура рельєфу визначає особливості і закономірності латеральних масо-переміщень. Ландшафтне районування на основі аналізу пластики рельєфу уможливорює виділення ділянок, схильних до природного самоочищення та вторинного самозабруднення. Детальний аналіз морфодинамічних особливостей рельєфу має використовуватись для прогнозування зміни меж ареалів радіаційного забруднення, що відбувається внаслідок діяльності природних процесів. Подальші дослідження варто спрямувати на кількісне моделювання прогнозування можливих змін радіаційного забруднення зон відчуження за допомогою морфодинамічного аналізу територій на основі обробки часових серій радіаційних вимірювань.

Список використаної літератури

1. Лялько В.И. Комплексирование многозональных космических снимков различного пространственного разрешения для повышения эффективности исследований лесных массивов (на примере зоны отчуждения ЧАЭС и районов Сибири) / В.И. Лялько, А.И. Сахацкий, А.Я. Ходоровский, [та ін.] // Космічна наука і технологія. – 2002. – Т. 8, № 2/3. – С. 239–246.
2. Орлов О.О. Біогеохімія Цезію-137 у лісоболотних екосистемах Українського полісся / О.О. Орлов, В.В. Долін // – К.: Наук. Думка, 2010. – 198 с.
3. Шестопапов В.М. Ідентифікація автореабілітаційних процесів у водотоках зони відчуження та можливе спрямування реабілітаційної діяльності / В.М. Шестопапов, О.Л. Шевченко, О.М. Козицький [та ін.] // Бюл. Екол. стану зони відчуження та зони безумовного (обов’язкового) відселення. – 2000. № 16. – С. 18–23.
4. Гудзенко В.В. Цезий, как техногенный индикатор инфильтрационного процесса / В.В. Гудзенко, Н.Г. Лютая // Доклады 3-го Всесоюзного научно-технического совещания по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. – Чернобыль-92, Сборник тезисов. – Зеленый мыс, 1992. – Т. I, Часть II – С. 482–489.
5. Ласточкин А.Н. Морфодинамическая концепция общей геоморфологии / А.Н. Ласточкин // – Л.: Недра, 1991. – 340 с.

6. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). [Електронний ресурс] Режим доступу <http://earthexplorer.usgs.gov/>

7. Distribution Map of Radiation Dose – Soil concentration map. [Електронний ресурс] Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology – Japan. Режим доступу <http://ramap.jmc.or.jp/map/eng/>

8. Monitoring information of environmental radioactivity level. Nuclear Regulation Authority. [Електронний ресурс] Режим доступу <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/>

Стаття надійшла до редакції 14.07.14 українською мовою

© Н.В. Пазинич, В.Е. Филиппович, С.А. Станкевич

**МОРФОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА ТЕРРИТОРИЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ
РАДИАЦИОННОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ (НА ПРИМЕРЕ ЗОН ОТЧУЖДЕНИЯ
АТОМНЫХ СТАНЦИЙ ЧЕРНОБЫЛЬ И ФУКУСИМА-1)**

Согласно методике морфодинамического анализа рельефа, отработанной в зоне отчуждения Чернобыльской атомной станции, базируясь на цифровых моделях рельефа (ЦМР), проведены исследования в зоне радиационного загрязнения станции Фукусима-1. Определено, что рельеф является определяющим фактором при формировании радиационного «следа» для гористых местностей. В результате исследований на эталонных участках установлено возможность определения по данным ЦМР конкретных территорий, потенциально предрасположенных к самоочищению и самозагрязнению поверхностными денудационными процессами, а также возможность прогнозирования изменения границ ареалов радиационного «следа».

© N.V. Pazynych, V.E. Filipovich, S.A. Stankevich

**MORPHODYNAMIC ANALYSIS OF TERRITORIES AFFECTED
BY RADIOACTIVE CONTAMINATION (ON THE EXAMPLE THE EXCLUSION ZONES
OF NUCLEAR POWER PLANTS CHERNOBYL AND FUKUSHIMA-1)**

According to the procedure of morphodynamic terrain analysis, tested in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant, based on DEM, research in the area of radioactive contamination of Fukushima-1 was conducted. It was determined that the relief is a determining factor in the formation of radiation "trace" to highlands. As a result of research on the reference sites the possibilities of determine on DEM the areas potentially prone to self-cleaning and surface contamination by denudation were studied. As well as the ability to predict changes in the boundaries of areas of radiation "trace" was prospected.