Проект Наукова Книга

Н.Н. Куссуль, С.В. Скакун, А.Ю. Шелестов

АНАЛИЗ РИСКОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Н.М. КУССУЛЬ, С.В. СКАКУН, А.Ю. ШЕЛЕСТОВ

АНАЛИЗ РИСКОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Модели и технологии

ПРОЕКТ «НАУКОВА КНИГА»

КИЕВ • НАУКОВА ДУМКА • 2014

УДК 004.932, 528.854

Куссуль Н.М., Скакун С.В., Шелестов А.Ю. Анализ рисков чрезвычайных ситуаций на основе спутниковых данных. Модели и технологии. — Киев: Наук. думка, 2014. — 184 с.

ISBN 978-966-00-1449-7

Работа посвящена разработке методов и технологий геопространственного анализа рисков стихийных бедствий. Предлагается постановка задачи геопространственной оценки рисков, связанных со стихийными бедствиями, и приведена методология ее решения на основе использования разнородной информации (спутниковых и наземных данных, а также данных моделирования). Обосновываются этапы решения этой задачи и ансамблевый подход к обработке данных разной природы. Рассматриваются примеры практического применения разработанных методов и информационных технологий для оценки риска затоплений и засух.

Для научных сотрудников, занимающихся моделированием рисков стихийных бедствий, ликвидацией их последствий, а также для преподавателей и студентов высшей школы соответствующих специальностей.

Працю присвячено розробці методів і технологій геопросторового аналізу ризиків стихійних лих. Запропоновано постановку задачі геопросторової оцінки ризиків, пов'язаних зі стихійними лихами, і викладено методологію її вирішення з використанням різнорідної інформації (супутникових та наземних даних, а також результатів моделювання). Обгрунтовуються етапи вирішення цієї задачі та ансамблевий підхід до обробки даних різної природи. Розглядаються приклади практичного застосування розроблених методів та інформаційних технологій для оцінки ризику затоплень і засух.

Для науковців, що займаються моделюванням ризиків стихійних лих, ліквідацією їхніх наслідків, а також для викладачів і студентів вищої школи відповідних спеціальностей.

Рецензенты:
доктор физико-математических наук *О.П. Федоров*,
академик НАН Украины *О.В. Палагин*,
доктор технических наук, профессор *П.И. Бидюк*

Рекомендовано в печать ученым советом
Института космических исследований НАН Украины
и ГКА Украины (протокол № 6 от 06.10.2013 г.)

Видання здійснено за державним замовленням
на випуск видавничої продукції

Научно-издательский отдел
физико-математической и технической литературы
Редактор *О.А. Микитенко*

© Н.М. Куссуль, С.В. Скакун, А.Ю. Шелестов, 2014
© НВП «Видавництво "Наукова думка" НАН України», дизайн, 2014

ISBN 978-966-00-1449-7

ПРЕДИСЛОВИЕ

Глобальные процессы изменения климата и стремительное развитие цивилизации привели к значительному усилению кризисных явлений как стихийной природы, так и техногенного характера. Мировое сообщество уделяет большое внимание мониторингу чрезвычайных ситуаций на всех стадиях их развития. Организация Объединенных Наций (ООН) даже ввела понятие «цикл развития чрезвычайной ситуации», в котором отдельное место отводится этапу подготовки: анализу риска и раннему предупреждению о катастрофах. В классической литературе под риском понимают вероятность потерь, вызванных опасными явлениями природы или человеческой деятельностью. Международное сообщество более 30 лет издает научный журнал по анализу рисков «Risk analysis» с высоким импакт-фактором, где публикуются результаты исследований в области оценки рисков, связанных с изменениями климата и неблагоприятными обстоятельствами техногенного характера.

В математическом смысле риск рассматривается как функция вероятности наступления неблагоприятной ситуации и обусловленных ею убытков. Математический аппарат анализа и оценки рисков включает прогнозное моделирование и сценарный анализ, а также построение вероятностных оценок.

Бурное развитие информационных технологий и лавинообразное увеличение объемов доступных данных различной природы, в частности спутниковых, активизировали исследования в области геопространственного анализа рисков чрезвычайных ситуаций. Несколько лет назад Европейское космическое агентство совместно с Мировым банком инициировали программу анализа рисков на основе данных наблюдения Земли. Поскольку геопространственный анализ рисков предполагает обработку больших объемов данных из разных источников и построение сложных пространственных моделей, решение этой задачи требует создания соответствующих автоматизированных информационных технологий на базе международных стандартов обмена геопространственной информацией.

В процессе выполнения международных проектов авторы разработали методы и информационные технологии анализа рисков, связанных с чрезвычайными ситуациями природного характера, а также принимали участие в разработке международных систем анализа рисков на основе спутниковой информации. Данная монография обобщает исследования авторов в сфере геопространственного анализа рисков. Она состоит из двух частей, охватывающих методологию анализа рисков стихийных бедствий и информационные технологии мониторинга и оценки рисков соответственно.

Первая часть работы (гл. 1—5) включает описание предлагаемого авторами подхода к геопространственной оценке рисков на основе слияния разнородных данных, а также конкретные модели и методы анализа рисков паводков и засух по спутниковым и наземным данным. Вторая часть (гл. 6—9) посвящена информационным технологиям мониторинга и оценки рисков чрезвычайных ситуаций на основе международных стандартов обмена геопространственной информацией. Результаты, опубликованные ранее в периодических изданиях, приводятся со ссылкой на первоисточник.

Предложенные подходы и решения успешно реализованы и апробированы в процессе выполнения конкурсных проектов и международных грантов. Разработанное программное обеспечение и наработанные практики используются в региональном центре поддержки программы UN — SPIDER, Международной хартии International Charter «Space and Major Disasters», реализуются в рамках программы GEOGLAM и проекта JECAM комитета наблюдения Земли GEO. Практическая реализация разработанных методов подтверждает эффективность предложенного научного подхода, разработанных моделей и технологий.

Авторы выражают благодарность своим коллегам — сотрудникам и аспирантам отдела космических информационных технологий и систем Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины — за активное участие в научных проектах, результаты которых отражены в монографии. Авторы благодарны научному сотруднику Института космических исследований НАНУ-ГКАУ А. Колотию за существенную помощь в подготовке монографии к изданию. Особая благодарность рецензентам за внимательное отношение к работе, за высказанные замечания и пожелания.

Часть 1

МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКОВ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ НА ОСНОВЕ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

**Анализ подходов
К оцениванию рисков чрезвычайных ситуаций
на основе спутниковых данных**

*

**Оценивание рисков чрезвычайных ситуаций
природного характера на основе
слияния данных**

*

**Картографирование наводнений
по радарным данным**

*

**Оценивание риска наводнений
на основе геопространственной информации**

*

**Оценивание риска засух
на основе геопространственных данных**

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНИВАНИЮ РИСКОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Изменения климата — причина наступления многих природных чрезвычайных ситуаций (ЧС): паводков, засух, снегопадов, лесных пожаров и т.п., наносящих огромный ущерб экономике отдельных стран и даже целых регионов. В последние годы для мониторинга природных чрезвычайных ситуаций все чаще применяют геопространственные данные различной природы: аэрокосмические снимки и продукты (например, цифровая модель рельефа, карты землепользования), а также данные двух- или трехмерного моделирования (в частности, метеорологического или гидрологического). При использовании такого рода информации в результате мониторинга получают цифровые карты или многослойные геопространственные данные, которые существенно упрощают процесс принятия решения соответствующими органами. Эту информацию можно использовать не только для картографирования районов ЧС во время или после самого наступления события, но и на других стадиях цикла развития чрезвычайной ситуации (disaster cycle), в том числе для построения карт рисков с вероятностью наступления события и связанного с ее наступлением ущерба.

Проблеме разработки операционных сервисов оценки рисков природных чрезвычайных ситуаций в Европе посвящен проект SAFER (http://www.emergencyresponse.eu) программы GMES/Copernicus (Global Monitoring for Environment and Security) [1]. Яркими примерами информационных сервисов мониторинга, картографирования и моделирования рисков затоплений, а также оценки связанных с ними потерь являются информационные продукты и сервисы компании Ambiental (Великобритания, http://www.ambiental.co.uk). Она является мировым лидером в области разработки детальных карт рисков затоплений, в том числе с привлечением социоэкономической информации. Компания Ambiental предоставляет информационные продукты и сервисы заинтересованным государственным органам предотвращения ЧС, органам планирования развития урбанизованных территорий, имущественному и коммунальному сектору, страховым компаниям и т.п. Заслуживает также внимания опыт Агентства по мониторингу окружающей среды (Environment Agency) Великобритании по оцениванию рисков затоплений и предоставлению через портал соответствующих информационных услуг организациям и отдельным гражданам Великобритании (http://www.environment-agency.gov.uk).

Французское космическое агентство CNES активно развивает подход к оценке рисков инфекционных заболеваний, вызываемых насекомыми-пере-

носчиками инфекций при возникновении наводнений в странах Африки (http://www.redgems.org/spip.php?rubrique4). Однако используемые в операционных системах методы оценки рисков чаще всего слишком упрощены и не опираются на развитой в настоящее время математический аппарат оценки среднего риска по эмпирическим данным. Этот подход разработан для решения задач оценивания качества восстановления функциональных зависимостей на основе эмпирических данных и применяется в статистической теории обучения [2—4].

В данной работе предложены постановка и методология решения задачи оценки рисков, связанных с чрезвычайными ситуациями, на основе разнородной информации (спутниковых и наземных данных, а также результатов моделирования). Обоснован метод для решения этой задачи и рассмотрены примеры его практического применения для оценки риска затоплений и засух.

1.1. СТИХИЙНЫЕ БЕДСТВИЯ И СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

За последние десятилетия развитие космической техники и средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса позволило расширить возможности человечества в области мониторинга и оценивания рисков стихийных бедствий. Приборы, установленные на космических аппаратах, позволяют количественно оценивать параметры стихийных бедствий, например смещение грунта при землетрясениях, уровень воды при наводнениях, состояние растительности при засухах и т.п. Значительно расширились технологические возможности мониторинга стихийных бедствий в реальном времени вследствие увеличения частоты получения спутниковых данных, их пространственного разрешения, усовершенствования методов обработки данных, а также средств и технологий слияния данных (data fusion) [5—9].

Таким образом, можно не только более качественно осуществить мониторинг стихийных бедствий, но и разработать новые критерии для их выявления (идентификации или картографирования).

Действительно, при выявлении стихийного бедствия, как правило, базируются на размышлениях общего качественного характера, а для определения количественных показателей — на наземных наблюдениях. Очевидно, что по сравнению со спутниковыми данными возможности наземных наблюдений более ограничены. Поэтому количественные и качественные характеристики стихийного бедствия строятся на основе возможностей наземных наблюдений. Так, для мониторинга и оценивания риска наводнений важным является наличие данных о затопленных территориях (карта затоплений). Получение такой карты исключительно наземными наблюдениями для большой территории практически невозможно. Это обусловлено тем, что такой подход требует существенных человеческих и временных затрат, которые, как правило, задействованы для помощи населению и преодоления последствий. В свою очередь, карта затопленных территорий —

важный источник информации для уменьшения последствий будущих наводнений в определенном регионе. Фактически такая карта — единственный источник информации для построения и валидации гидрометеорологических моделей, которые, как правило, используют для оценивания рисков и моделирования разных сценариев развития опасной ситуации.

Приведем еще один пример, который связан с засухами. Классические критерии определения засух базируются на данных об осадках и влажности грунтов. Единственный источник такой информации — наземные метеорологические наблюдения. Однако такие наблюдения осуществляют в определенных точках, а точность аппроксимации для других геопространственных областей зависит от плотности расположения метеостанций, качества и повторяемости наблюдений. Увеличение плотности размещения метеостанций является чрезвычайно затратным, и не всегда экономически выгодно. Спутниковые данные и полученные на их основе геоинформационные продукты оценки объемов осадков, влажности грунтов, приземной температуры, состояния растительного покрова позволяют существенно расширить возможности определения засух и их мониторинга.

Заметим, что в данном контексте не нужно недооценивать роль наземных наблюдений. Они предоставляют референсные значения исследуемых параметров стихийного бедствия, которые далее можно использовать для получения и валидации информационных продуктов на основе спутниковых данных. Однако наблюдения Земли из космоса предоставляют существенно более широкие возможности для мониторинга и оценивания риска естественных ЧС вследствие таких свойств:

- покрытие значительных территорий;
- возможность получения независимой от человека (объективной) информации;
- повторяемость измерений как в пространстве, так и во времени;
- оперативности получения информации;
- поддержка всего цикла предотвращения стихийных бедствий: анализ и оценка рисков, подготовка (готовность), реагирование, восстановление;
- возможность ассимиляции в модели, например метеорологические и гидрологические, для повышения точности прогнозов;
- возможность использования для оценки как вероятности наступления ЧС статистического анализа архивных данных, так и убытков.

В данной главе рассмотрена возможность перехода от точечных (наземных) наблюдений к спутниковым данным в задаче оценивания риска природных чрезвычайных ситуаций.

Основные определения. Приведем основные определения, связанные с природными чрезвычайными ситуациями (ЧС) и стихийными бедствиями.

Чрезвычайная ситуация — это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на отдельной территории или объекте, вызванное аварией, катастрофой, стихийным бедствием или другим опасным событием, из-за которого на территории или объекте невозможна жизнедеятельность населения, ведение хозяйственной деятельности, а также вероятна гибель людей и (или) значительные материальные потери [10].

Стихийное бедствие — это чрезвычайное природное явление большой разрушительной силы, наносящее значительный ущерб региону, в котором происходит, нарушающее нормальную жизнедеятельность населения и приводящее к уничтожению материальных ценностей [11].

Стихийными бедствиями являются [11—13] наводнения (паводки), засухи, лавины, лесные и торфяные пожары, землетрясения, извержения вулканов, сдвиги, штормы, цунами и т.п.

Согласно статистическим данным [14] гидрометеорологические стихийные бедствия, такие как наводнения и засухи, составляют в мире значительную их часть (больше 50 %). В Украине гидрометеорологические стихийные бедствия становятся причиной ЧС на государственном и региональном уровнях со значительным материальным ущербом (65—80 % общей суммы убытков от всех чрезвычайных ситуаций) [15].

В последние годы все больше внимания уделяется применению риск-ориентированного подхода для определения степени опасности ЧС и использованию значения риска как одного из критериев при принятии соответствующих решений для уменьшения последствий ЧС [10, 16—20].

Риск — это количественная мера опасности, которая определяется функцией двух переменных: вероятности негативного события (в данном случае стихийного бедствия) и размера убытков от нее [10]. (Понятие риска и различные меры его оценивания детально рассмотрены в параграфе 1.2.)

В данной работе основное внимание уделено наводнениям и засухам — явлениям, приводящим к наибольшему ущербу.

Наводнение — это природное явление, возникающее, когда вода выходит за пределы обычных для нее границ и затапливает значительные участки земной суши.

Как уже отмечалось, определение границ затопленных территорий и уровня воды, быстрая оценка убытков в пострадавших регионах лишь по наземным наблюдениям являются чрезвычайно затратными. На сегодня разработан ряд методов, позволяющих идентифицировать затопленные регионы на основе спутниковых изображений, полученных в разных диапазонах электромагнитного излучения [21—26]. Объединение полученных по спутниковым данным площадей затопленных территорий с цифровой моделью рельефа (ЦМР, DEM — Digital Elevation Model) позволяет косвенно оценить уровень разлива воды [27—29]. На основе информации о проживающем населении и размещении критически важных объектов можно получить количественную экспресс-оценку повреждений и возможных убытков. Уровень воды, определенный с привлечением спутниковых изображений ДЗЗ, в дальнейшем можно ассимилировать в гидродинамическую модель и, таким образом, существенно уменьшить неопределенность прогноза [30, 31].

На сегодняшний день технологические возможности позволяют получать спутниковые данные в оперативном режиме — на протяжении 3—12 часов после съемки [21, 23, 32—36]. Поэтому карты с границами затопленных территорий, значениями уровня воды, затопленных объектов, полученные в оперативном режиме, могут оказаться полезными как соответствующим службам, так и пострадавшим во время наводнения.

Можно выделить такие преимущества использования спутниковых данных при решении задачи анализа риска наводнений:

- оперативность получения информации;
- получение информации (затопленных территорий, уровня воды) для всей территории, а не точечных измерений;
- возможность определения уровня воды в результате комбинации данных о затопленных территориях и цифровой модели рельефа;
- возможность ассимиляции в гидрологические модели для уменьшения ошибок прогнозирования;
- возможность выполнения статистического анализа архивных изображений.

Засуху можно определить как недостаток или отсутствие водоснабжения в некотором регионе на протяжении продолжительного периода времени из-за отсутствия осадков при повышенных температурах и снижении влажности воздуха, что обусловливает исчезновение запасов влаги в почве [37, 38, 39].

Различают такие виды засух [38]:

- *метеорологические*: недостаток осадков на протяжении некоторого промежутка времени;
- *гидрологические*: недостаток поверхностных и грунтовых вод;
- *сельскохозяйственные*: недостаточный запас влаги в грунтах, что приводит к повреждениям сельскохозяйственных культур.

Сложность выявления засух заключается в том, что, во-первых, очень сложно определить начало развития засухи и ее завершение. Влияние засухи обычно проявляется медленно и аккумулируется на протяжении определенного промежутка времени. Во-вторых засухи в основном напрямую не наносят структурных повреждений (в отличие от наводнений, пожаров, ураганов) и прежде всего влияют на наличие водных ресурсов. Это усложняет процесс оценки повреждений и потерь от засух [40]. В-третьих, человечество своими действиями может вызвать развитие засух за счет интенсификации сельского хозяйства, перерасхода естественных водных ресурсов, уничтожения лесонасаждений, что влияет на возможность грунта задерживать и хранить воду [38].

Поэтому на протяжении длительного времени не существовало единой классификации и критерия определения засух. В последние десятилетия было разработано большое количество разных индексов (индикаторов), с помощью которых оцениваются различные аспекты засух [37—39]. Основой таких индикаторов преимущественно являются наземные наблюдения, а в качестве переменных используют температуру, количество осадков, влажность грунтов, или комбинация этих параметров. В качестве примеров таких индексов можно привести индекс засух Палмера *PDSI* (Palmer drought severity index) [41—43], стандартизированный индекс осадков *SPI* (Standardized Precipitation Index) [42, 44], индекс влажности сельскохозяйственных культур *CMI* (Crop Moisture Index) [45], индекс запаса поверхностной влаги *SWSI* (Surface Water Supply Index) [46]. На основе этих индексов в 2000 г. была введена стандартизированная классификация интенсивности засух [47] (табл. 1.1, 1.2).

Спутниковые данные расширяют возможности мониторинга и определения засух и могут применяться для оценивания осадков [48—50], темпе-

Таблица 1.1. **Классификация интенсивности засух**

Категория	Потенциальное влияние
D0, аномальная	Кратковременная засуха — незначительное влияние, замедляющее развитие вегетации
D1, умеренная	Незначительные повреждения вегетации, но без существенных потерь урожая
D2, значительная	Высокая вероятность потерь урожая
D3, экстремальная	Значительные потери урожая
D4, чрезвычайная	ЧС на большой территории. Значительные (или полные) потери урожая

Таблица 1.2. **Соответствие значений индексов разным категориям засух**

Категория	Индекс		
	PDSI	*SPI*	*VHI*
D0	[–1,0; –1,9]	[–0,5; –0,7]	[36; 40]
D1	[–2,0; –2,9]	[–0,8; –1,2]	[26; 35]
D2	[–3,0; –3,9]	[–1,3; –1,5]	[16; 25]
D3	[–4,0; –4,9]	[–1,6; –1,9]	[6; 15]
D4	–5,0 или меньше	–2,0 или меньше	[0; 5]

ратуры (индекс *TCI* — Temperature Condition Index) [51, 52] и состояния растительности (индекс *VCI* — Vegetation Condition Index) [53—57]. Для оценивания температуры используют термальный спектр электромагнитного излучения, а для оценивания состояния растительности — видимый и инфракрасный (ИК) диапазоны. На основе комбинации индексов *TCI* и *VCI* предложен интегральный индекс здоровья растительности *VHI* (Vegetation Health Index) [54]. Индекс *VHI* нормирован от 0 (наибольший стресс вегетации) до 100 (наиболее благоприятные условия для развития растительности) и соответствует принятой классификации засух (см. табл. 1.1, 1.2).

Основные преимущества использования спутниковых данных в решении задачи анализа риска засух:

- новые критерии определения засух за счет использования данных, полученных в разных спектрах электромагнитного излучения (тепловой и ИК), которые характеризуют температурное состояние и запас влаги в растениях;
- оперативность предоставления информации для больших территорий;
- возможность анализа архивных изображений для определения статистических закономерностей, что позволяет оценить вероятность наступления неблагоприятного события.
- высокая экономическая эффективность по сравнению с наземными наблюдениями.

Другие стихийные бедствия. Рассмотрим использование спутниковых данных для стихийных бедствий иных типов, например, пожаров, землетрясений.

Для идентификации тепловых аномалий (и пожаров) используется термальный спектр электромагнитного излучения [58], а для выявления и

оценивания площадей, подвергшихся воздействию огня, — видимый диапазон [59—61]. По спутниковым данным можно также оценить биомассу растений, которая была повреждена из-за пожара [62].

При исследовании землетрясений методы дифференциальной интерферометрии [63, 64] являются стандартом де-факто для оценивания смещений земной поверхности. Спутниковые изображения высокого пространственного разрешения применяют для оценки повреждений жилищ и инфраструктурных объектов [65].

При мониторинге вулканов для определения температуры используют термальный спектр [66], для идентификации состава пород — оптический [67], для определения деформаций — радарную интерферометрию [68].

Картографирование земного покрова и землепользование. Задача картографирования (классификации) земного покрова и землепользования является важной при анализе рисков стихийных бедствий, поскольку обеспечивает основу для оценивания ущерба. Существуют как минимум два основных направления использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для картографирования земного покрова: улучшение эффективности наземного выборочного исследования картографируемой территории и непосредственное создание карт земного покрова с приминением классификации данных ДЗЗ по результатам наземных исследований [69—75].

В первом случае наиболее часто используемым подходом является стратификация: она позволяет уменьшить дисперсию оценок по сравнению с нестратифицированными (случайными) наземными наблюдениями и сократить средства, необходимые для проведения наземных исследований, их оптимизацией. Во втором случае спутниковые данные фактически являются единственным источником информации для построения глобальных или региональных карт.

Отметим, что задача картографирования земного покрова — по существу единственная задача, при решении которой количественно оценивается эффективность использования спутниковых данных. В данной работе этот подход расширен на область применения спутниковых данных для анализа риска чрезвычайных ситуаций.

Обобщенные преимущества использования спутниковых данных для мониторинга стихийных бедствий различных типов представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. **Преимущества использования спутниковых данных**

Стихийное бедствие	Новые возможности и преимущества	Стихийное бедствие	Новые возможности и преимущества
Наводнение	Оперативность Карты затопленных территорий Оценка повреждений Ассимиляция в модели	Землетрясение	Оценка деформаций (сдвигов) Оценка убытков (повреждений)
Засуха	Оперативность Определение засух Оценка повреждений	Извержение вулканов	Выявление тепловых аномалий Определение состава пород Оценка деформаций
Пожар	Выявление тепловых аномалий Оценка повреждений		

1.2. ПОНЯТИЕ РИСКА И ОБЗОР КОЛИЧЕСТВЕННЫХ МЕР РИСКА

1.2.1. Понятие риска

Понятие ***риск*** в русско- и украиноязычной научной литературе, как правило, рассматривается в контексте управления проектами и связывается с инвестиционными и финансовыми операциями. При этом исследуются риски капиталовложений. В классической литературе под *риском* понимают возможную опасность потерь, обусловленную спецификой тех или иных явлений природы и видов деятельности человеческого общества.

В англоязычной литературе кроме финансовых рисков очень часто исследуются риски, обусловленные ЧС естественного и техногенного характера. Последние 25 лет издается научный журнал «Risk analysis» (индекс цитирования — около 3), посвященный исследованию экологических рисков, связанных с изменениями климата и неблагоприятными обстоятельствами техногенного характера.

В общем случае *риск* — это вероятность гибели, повреждения, вреда или разрушения.

На сегодняшний день в большинстве стран мирового сообщества принята концепция «приемлемого риска» (ALARA — as low as risk acceptable), что позволяет использовать принцип «предусмотреть и предупредить». *Приемлемый риск* — это вероятность наступления события, негативные последствия которого настолько незначительны, что ради получаемой выгоды от фактора риска человек, группа людей или общество в целом готовы пойти на этот риск. Уровень приемлемого риска устанавливается при его сопоставлении с риском, который существует в повседневной деятельности или жизни людей. Эта концепция связана с определенной вероятностью болезней или повреждений, которую воспринимает человек, группа людей или общество. Уровень приемлемого риска зависит от научных данных, социальных, экономических и политических факторов.

В математическом смысле *риск* — это функция от вероятности наступления неблагоприятной ситуации и возможного ущерба от нее. Фактически в такой формулировке риск определяется как математическое ожидание ущерба, рассматриваемого в качестве случайной величины. Таким образом, один и тот же риск может обусловливаться либо высокой вероятностью возникновения неблагоприятной ситуации с незначительными последствиями (отсутствие дождей или паводок в малозаселенных и несельскохозяйственных районах), либо низкой вероятностью возникновения неблагоприятной ситуации с существенным ущербом (катастрофическая засуха в сельскохозяйственных районах).

При анализе опасностей для населения и окружающей среды применяют риск, отнесенный к единице времени. При этом за единицу времени чаще всего принимается 1 год.

Для анализа и оценки рисков используют прогнозное моделирование и сценарный анализ, рассматривая оптимистичный и пессимистический сценарии развития ситуации в зависимости от внешних условий. При этом применяется как дедуктивный, так и индуктивный подход к моделированию.

Дедуктивный подход основывается на экспертных моделях и является более субъективным. Индуктивный подход предполагает построение зависимости между известными событиями (фактами) и факторами, которые могли на них повлиять (предикторами). Это могут быть инфраструктурные, социоэкономические, топографические, метеорологические и иные факторы. Для исследования взаимосвязи событий и факторов влияния применяют статистический анализ и регрессионные прогнозные модели.

1.2.2. Количественные меры риска

Для более четкого понимания возможностей по защите населения от чрезвычайных ситуаций сначала необходимо определить, как риски можно оценить количественно. Также необходимо установить, как можно определить риск возникновения ЧС, и как понятие риска можно применить для принятия решений. Проанализируем некоторые литературные источники, где рассмотрены меры риска, используемые в процессе количественного анализа риска (quantitative risk analysis). В этих источниках *мера риска* — это математическая функция с аргументами вероятности события и последствий этого события. Более полный обзор исследования мер риска приведен в работе [76].

Индивидуальные меры риска. Рассмотрим индивидуальный риск (individual risk — *IR*), или риск в точке. Его определяют как вероятность того, что среднестатистический незащищенный человек, который постоянно находится в данной точке, погибнет из-за аварии в процессе небезопасной деятельности [76]:

$$IR = P_f\, P_{d|f}, \tag{1.1}$$

где P_f — вероятность аварии (в определенный год); $P_{d|f}$ — вероятность гибели человека при возникновении аварии с учетом того, что незащищенный человек постоянно находится в данной точке.

Индивидуальные меры риска: области применения и стандарты. Индивидуальный риск — характеристика местоположения. Этот параметр используют при пространственном планировании. Местности с одинаковым уровнем индивидуального риска можно изобразить на карте с помощью так называемых контуров риска. Меру индивидуального риска используют в Голландии для ограничения рисков возле опасных объектов и транспортных маршрутов. Голландское министерство жилищного строительства, территориального планирования и окружающего среды установило следующие стандарты для населенных территорий [77]:

$$IR < 10^{-6}/\text{ год}. \tag{1.2}$$

Риски с вероятностью меньше чем 10^{-6} в год необходимо снижать настолько, насколько это возможно. Предел установлен для вынужденных рисков, связанных с необходимостью выполнения опасных видов деятельности. Метод TAW [78] позволяет ограничить спектр возможных рисков, начиная от добровольной деятельности (например, альпинизм) и заканчивая вынужденной деятельностью (например, работа на опасных объектах).

Таблица 1.4. **Значения фактора политики β в зависимости от степени добровольности деятельности и полученной пользы**

β	Степень добровольности деятельности	Полученная польза (выгода)	Пример
100	Полностью добровольная	Прямая польза	Альпинизм
10	Добровольная	Прямая польза	Езда на мотоцикле
1	Нейтральная	Прямая польза	Езда на автомобиле
0,1	Вынужденная	Некоторая польза	Работа на фабрике
0,01	Вынужденная	Никакой пользы	Обитание возле станции LPG

Еще одна зависимость, предложенная в методе TAW, имеет вид [78]

$$IR < 10^{-4}/\text{год}. \tag{1.3}$$

Здесь значение фактора политики β варьируется в зависимости от степени добровольности деятельности и полученной пользы (табл. 1.4).

Социальные меры риска. В работе [79] *социальный риск* определен как «отношение частоты и количества людей, пострадавших из-за определенного уровня бедствия в данной популяции, от реализации указанной опасности». Если индивидуальный риск — это вероятность смерти на определенном месте, то социальный риск — количественный показатель для целой области независимо от конкретного места, где в этой области возникла ЧС. Различия между этими мерами риска показаны на рис. 1.1 (в обоих случаях одинаковые уровни — это индивидуальные уровни риска (IR' и IR). Из-за бóльшей плотности населения в случае B бóльший социальный риск [80]).

В основу расчетов социальных рисков положена функция плотности распределения вероятности (probability density function) годового количества погибших N. Из функции плотности можно получить кривую F_N вероятности превышения как функцию от числа жертв на двойной логарифмической шкале:

$$1 - F_N(x) = P(N > x) = \int_x^\infty f_N(x)dx, \tag{1.4}$$

где $f_N(x)$ — функция плотности распределения вероятности годового количества погибших; $F_N(x)$ — функция плотности распределения вероятности годового количества погибших, свидетельствующую о том, что вероятность меньше чем x смертностей в год.

Простой мерой для социальных рисков есть ожидаемое значение числа смертельных случаев в год $E(N)$. В научной литературе часто ссылаются на так называемую возможную потерю жизни (Potential Loss of Life):

$$E(N) = \int_x^\infty x f_N(x)dx. \tag{1.5}$$

Британское управление по вопросам здравоохранения, техники безопасности и охраны труда определило интегральные риски в качестве меры социального риска:

$$IR = \int_0^\infty x(1 - F_N(x))dx. \tag{1.6}$$

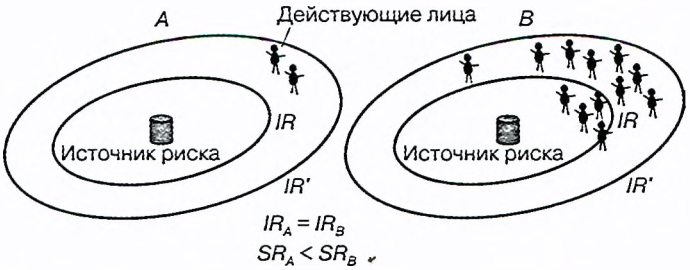

Рис. 1.1. Сравнение индивидуальных и социальных рисков

В 1997 г. было математически доказано [81], что интегральный риск можно выразить через функцию плотности распределения вероятности годового количества погибших ($E(N)$ — ожидаемое значение; $\sigma(N)$ — стандартное отклонение):

$$IR = 1/2\ (E^2(N) + \sigma^2(N)). \tag{1.7}$$

Из функции плотности распределения вероятности ожидаемого количества смертей можно получить $E(N)$ и $\sigma(N)$. Объединение этих двух элементов общего риска было предложено [81] в качестве меры социального риска:

$$TR = E(N) + k\sigma(N). \tag{1.8}$$

Эта мера учитывает несклонность к риску (risk aversion) при редких авариях с большим количеством жертв как умножение индекса непринятия риска k на стандартное отклонение. Формулы могут выглядеть по-разному, но описанные в [81] социальные меры риска базируются на использовании функции плотности распределения вероятности количества погибших.

Социальные меры риска: области применения и стандарты. В ряде стран риски разных опасных видов деятельности ограничены критерием вероятности превышения F_N. Эти стандарты можно описать таким выражением:

$$1 - F_N(x) < \frac{C}{x^n}, \tag{1.9}$$

где n — крутизна ограничительной линии; C — постоянная, определяющая положение этой линии.

Стандарт при $n = 1$ называется *нейтральным* к риску. Если $n = 2$, то стандарт должен обеспечить «обход» риска. В этом случае большие аварии являются взвешенными с большим весом и с относительно низкой вероятностью. В Министерстве жилищного строительства, территориального планирования и окружающего среды Голландии стандарт применяется для опасных объектов с постоянными $C = 10^{-3}$, $n = 2$.

Ожидаемое количество погибших можно использовать в управлении рисками на дамбах. Требуемые стандарты были предложены гидрологической службой Британской Колумбии [82] и Бюро мелиорации США [83] соответственно

$$E(N) < 10^{-3} \text{ жертв/год},$$
$$E(N) < 10^{-2} \text{ жертв/год}. \tag{1.10}$$

В качестве стандартного предельного значения для общего риска [81] было предложено использовать $TR < 100\beta$, что учитывает описанный выше фактор политики β.

Экономические меры риска. Кривая вероятности превышения F_D показывает вероятность превышения риска в зависимости от экономического убытка. Кривую F_D и ожидаемые значения экономического ущерба можно получить, используя функции плотности распределения вероятности экономического ущерба ($f_D(x)$):

$$1 - F_D(x) = P(D > x) = \int_x^\infty f_D(x)dx\,, \tag{1.11}$$

$$E(D) = \int_0^\infty x f_D(x)dx\,, \tag{1.12}$$

где $F_D(x)$ — функция распределения вероятности экономического ущерба; $E(D)$ — ожидаемое значение экономического ущерба.

Проблему приемлемого уровня риска также можно сформулировать как экономическую задачу принятия решений [84]. По методу экономической оптимизации общих затрат в системе C_{tot} определяется суммированием инвестиций I для более безопасной системы и ожидаемого значения экономического ущерба. В оптимальной экономической ситуации общая стоимость в системе минимизируется:

$$\min(C_{tot}) = \min(I + E(D)). \tag{1.13}$$

С помощью этого критерия можно определить оптимальную вероятность сбоя в системе, когда инвестиции I и ожидаемый экономический ущерб $E(D)$ являются функциями вероятности отказа.

Экономические меры риска: область применения и стандарты. В Великобритании затраты на предотвращение наводнений анализируют, используя ожидаемый экономический ущерб [85]. При этом его вычисляют до и после реализации соответствующих мер. Различие между этими двумя значениями — преимущество, которое можно оценить относительно затрат на меры. Мера *BC Hydro* [86] была предложена для оценки ожидаемого экономического ущерба на год для дамб, в которых финансовые риски для одной дамбы не должны превышать заданное значение:

$$E(D) < 10\,000 \text{ дол. США/год}. \tag{1.14}$$

Метод экономической оптимизации был применен в [84] для определения оптимального уровня защиты от наводнений (например, высота дамбы) в Центральной Голландии. Общий объем инвестиций в повышение дамб I_{tot} определяется начальными I_0 и переменными затратами I', а также повышением дамбы на X, м (где h — новая высота дамбы, h_0 — текущая высота дамбы):

$$I_{tot} = I_0 + I' - X, \quad X = h - h_0. \tag{1.15}$$

Ожидаемый экономический ущерб можно рассчитать с учетом вероятности паводка P_b, ущерба D, вызванного этим наводнением, и процента скид-

ки r'. Уровень наводнения h моделируется как экспоненциальное распределение с параметрами A и B:

$$P_b = e^{-\frac{h-A}{B}}, \quad E(D) = \frac{P_b D}{r'}. \tag{1.16}$$

В настоящее время общие затраты принято представлять в виде суммы инвестиций и ожидаемого значения экономического ущерба. При этом оптимальное значение находят минимизацией общих затрат. Оптимальную вероятность паводка $P_{b.opt}$ и высоту дамбы h_{opt} можно определить с помощью производной от общих затрат и высоты дамбы:

$$P_{b.opt} = \frac{I'Br'}{D}, \quad h_{opt} = A - B\ln(P_{b.opt}). \tag{1.17}$$

Меры риска: области применения и стандарты. В табл. 1.5 приведены наиболее важные характеристики описанных выше мер риска: математическое выражение, область применения, стандарты и литературный источник.

Таблица 1.5. **Обзор мер риска**

Мера риска	Математическое выражение	Область применения	Стандарты	Литературный источник
Индивидуальный риск	$IR = P_f P_{d\backslash f}$	Опасные объекты/транспортные маршруты	$<10^{-6}$	[77]
Индивидуальный риск TAW	$IR = P_f P_{d\backslash f}$	Тематические исследования, наводнения	$< 10^{-4}$ β	[78]
Кривая F_N	$1 - F_N(x) = \int_x^\infty f_N(x)dx$	Опасные объекты	VROM: $1-F_N(x) < 10^{-5}/x^2$	[80]
Ожидаемое количество погибших в год	$E(N) = \int_0^\infty x f_N(x)dx$	Дамбы (США, Канада)	$<10^{-2}$ USBR $<10^{-3}$ *BC Hydro*	[82, 83]
Интегральный риск	$IR = \int_0^\infty (1 - F_N(x))x dx$	HSE (Великобритания): землеустройство	—	[87]
Общий риск	$TR = E(N) + k\sigma(N)$	Разные тематические исследования	< 100 β	[81]
Кривая F_D	$1 - F_D(x) = \int_x^\infty f_D(x)dx$	—	—	—
Ожидаемый экономический ущерб	$E(D) = \int_0^\infty x f_D(x)dx$	Безопасность дамб	$E(D) < 10\,000$ дол. США	[85]
Экономическая оптимизация	$\min(C_{tot}) = \min(I + E(D))$	Защита от наводнений	Экономический оптимум	[85]

1.3. АНАЛИЗ РИСКОВ ПРИРОДНЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Поскольку неблагоприятные ситуации, как правило, развиваются в пространстве и во времени, для анализа рисков важно использовать разную геопространственную информацию: спутниковые данные, данные наземных измерений и пространственного моделирования (например, цифровую модель рельефа, гидрологические и метеорологические модели). В этом случае оценивается индивидуальный и потенциальный риски. В результате такого анализа можно получить карты рисков, учитывающие экономические, социально-культурные и другие виды ущерба. Для интерактивного анализа информации и поддержки принятия решений эту информацию удобно представлять и обрабатывать в геоинформационных системах (ГИС).

В последние годы геопространственному анализу рисков посвящается все больше публикаций [88—99]. Важным источником информации для геопространственного анализа рисков являются спутниковые данные, обеспечивающие детализированную повторяемую объективную информацию о ходе развития неблагоприятной ситуации (см. параграф 1.1). Для автоматизированной обработки таких данных в реальном режиме времени все чаще применяют методы интеллектуальных вычислений и машинного обучения, а также байесовский подход. Однако системной методологии оценки рисков природных чрезвычайных ситуаций на основе разных данных, в частности спутниковых, пока еще не создано.

Проанализируем модели, методы и технологии, которые используются для анализа рисков естественных чрезвычайных ситуаций на основе спутниковых данных. Отдельно выделим подходы для картографирования чрезвычайных ситуаций, оценки ущерба, вероятности и, собственно, риска. Эти вопросы рассмотрены для гидрометеорологических стихийных бедствий, таких как наводнения и засухи.

1.3.1. Анализ рисков наводнений на основе спутниковых данных

Методы картографирования наводнений на основе спутниковых данных. Одна из актуальных задач, возникающих при мониторинге наводнений, — оценка площадей затопленных территорий. Информация, полученная на основе спутниковых изображений, имеет неоценимое значение для калибровки и проверки адекватности гидравлических моделей [36, 100—104]. Преимуществом использования оптических данных является возможность получения информации во многих спектральных каналах (например, в гиперспектральных приборах — до 100 каналов). Кроме того, такие данные в отличие, например, от радиолокационных, намного проще в процессе интерпретации и дешифровки. Зачастую для выделения на изображении воды вполне достаточно применять методы пороговой сегментации [105] или индексы [106].

Вместе с тем облачный покров и атмосферные искажения могут существенно ограничить возможности использования этих данных при решении

многих прикладных задач. Применение радиолокационного оборудования позволяет избежать таких ограничений [107, 108]. В то же время оптические данные соответствуют одному значению длины волны, т.е. одному спектральному каналу.

При использовании радиолокационных систем на результирующее значение коэффициента обратного рассеяния влияет много факторов: тип подстилающей поверхности (суша или водная поверхность), наличие растительного покрова на суше или волн на водной поверхности, шераховатость поверхности, влажность, параметры радиолокационной системы (поляризация, длина волны) и т.п. Поэтому для получения геофизических параметров нужно решить некорректно поставленную обратную задачу восстановления параметров подстилающей поверхности по одному или нескольким значениям, полученным с помощью радиолокационной системы (при наличии временных рядов, нескольких поляризаций или информации о фазе).

При использовании радиолокационных данных для решения конкретных прикладных задач нужно учитывать специфику каждой из них. Например, картографирование наводнений с использованием радиолокационных данных основывается на том, что вода (в спокойном состоянии, без волн) не отражает волн в СВЧ-диапазоне и, соответственно, будет иметь небольшое значение коэффициента обратного рассеяния [109].

В настоящее время радиолокационные данные в сантиметровом или дециметровом диапазонах электромагнитных волн поставляются большим количеством миссий, в том числе ERS-1 (до 2000 г.), ERS-2 (до 2011 г.), ALOS/PALSAR (до 2011 г.), Envisat/ASAR (до 2012 г.), Radarsat-1/2, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed. В 2014—2015 гг. Европейское космическое агентство (EKA) планирует запуск двух радиолокационных спутников серии Sentinel-1/SAR, причем данные должны предоставляться бесплатно.

В EKA предложено использовать разновременные снимки одной территории, сделанные во время паводковой ситуации и без нее [35]. Если значение коэффициента обратного рассеивания на изображении с наводнениями уменьшилось, то такой пиксел соответствует затопленной территории. Для оперативного картографирования затопленных территорий на основе данных со спутника ENVISAT/ASAR этот метод реализован в виде операционного сервиса в Grid-инфраструктуре Grid Processing on Demand (G-POD, http://eogrid.esrin.esa.int).

В работе [110] для сегментации радиолокационных изображений применен статистический метод активных контуров. Контуры затопленных территорий в данном подходе определяют, используя оценку локальных текстур и тон изображения. Границы между гомогенными регионами изображения рассчитывают по весовым коэффициентам, которые находят из определения экстремумов в модели баланса энергий:

$$E(\mathbf{u}(s)) = E_{ten} + E_{curv} - \iint G(I(x,y))dxdy,$$

где $\mathbf{u}(s)$ — позиция контуров; E_{ten}, E_{curv} — энергии, которые генерируются моделью напряжения и внешними ограничениями; $G(\cdot)$ — функция качества, которое показывает, насколько набор значений пикселов $I(x, y)$ удовлетворяет некоторому критерию.

Предложенный подход использовали для сегментации радиолокационных изображений спутника ERS-1. Точность сегментации по определению границ вода/суша составила 1 пиксел. Применение метода активных контуров ограничено следующими факторами:

- возможностью попадания в локальный минимум;
- сложностью моделирования контуров сложной формы;
- зависимостью от заданных начальных условий «змейки» [111].

Кроме того, для статистического метода активных контуров необходимо задавать априорные статистические значения распределений.

В работе [112] для сегментации и картографирования наводнений был использован метод определения границ изображений. Специально разработанный алгоритм (blocktracing) применяли для разделения изображения на классы «Суша» и «Вода». Более точное разделение достигается за счет использования вейвлетных методов. Точность определения границ в среднем составила 2,5 пиксела в отличие от значений, полученных оператором вручную.

В работе [113] предложен алгоритм разделения изображения на классы «Суша» и «Вода», основанный на теории нечетких множеств и использовании меры когерентности Г радиолокационных изображений, вычисляемой с применением интерферометрии InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar):

$$\Gamma = \frac{E[I_1 I_2^*]}{\sqrt{E[|I_1|^2]E[|I_2|^2]}},$$

где I_1, I_2 — комплексно-сопряженные радиолокационные изображения. Недостаток применения алгоритма InSAR — сложность самой процедуры и необходимость наличия нескольких изображений.

В работе [114] для анализа динамики затопленных территорий в Амазонии используется временной ряд из 21 радиолокационного изображения (в L-диапазоне) спутника JERS-1/PALSAR. Разработанный метод классификации базируется на вычислении среднего значения коэффициента обратного рассеяния по всему временному ряду и специального коэффициента изменений AC по формуле

$$AC = 10\log\left[\frac{2}{N(N-1)}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j>i}R_{ij}\right],$$

где $R_{ij} = \max(\langle I_i\rangle/\langle I_j\rangle, \langle I_j\rangle/\langle I_i\rangle)$. Первый параметр позволяет грубо классифицировать изображение на разные типы растительного покрова, а второй — оценивать динамику изменений наводнения. При использовании предложенного подхода точность классификации зависит от количества изображений во временном ряде. Например, для достижения точности классификации 90% требуется обработать не менее восьми изображений.

В работе [115] предложен метод сегментации радиолокационных данных спутника COSMO-SkyMed, в котором выполняют морфологические операции на изображении. При этом морфологические операции применяют для числового ряда из пяти космических изображений. Однако в данной работе точность полученных карт не оценивается.

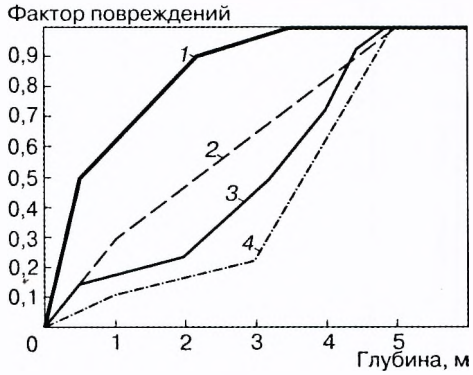

Рис. 1.2. Функция потерь для разных типов земной поверхности в зависимости от глубины затопления [117]: *1* — озимая пшеница; *2* — дороги; *3* — индустриальные объекты; *4* — жилые постройки

Оценивание ущерба, причиненного наводнениями, на основе спутниковых данных. Эффективность использования спутниковых изображений для оценивания убытков от наводнения описана во многих исследованиях (см., например, 88—91, 116, 117).

В работе [116] для оценивания ущерба от наводнения представлена система поддержки принятия решений. Согласно ей для оценивания потенциального ущерба в городских домах и повреждения сельскохозяйственных культур используют результаты гидравлического моделирования, а также информацию из других источников (в том числе, спутниковые изображения).

В работе [117] спутниковые изображения применяют для построения карты земного покрова. Она необходима для построения карты коэффициента Меннинга (шероховатости поверхности) для зон затопления (для дальнейшего моделирования), а также для формирования входных данных, применяемых для оценки потенциального ущерба из-за наводнения. В работе была использована функция ущерба, приведенная на рис. 1.2. С использованием карт земной поверхности, глубины затоплений для исследуемой территории (южная часть Голландии) и функции повреждений было получено значение общего ущерба. При этом для опеределения глубины затоплений использовали гидрологическую модель LISFLOOD-FP, откалиброванную с применением карты затоплений, полученной в результате обработки радиолокационного спутникового изображения ERS-2.

В [88] были рассмотрены вопросы, связанные с использованием спутниковых данных для оценки ущерба после возникновения ЧС. Для повышения качества конечного результата (объединением результатов анализа дистанционных изображений и гидрометеорологических моделей) учитывались также требования службы гражданской защиты.

В работе [89] описаны возможности использования данных ДЗЗ для оценки риска наводнений в урбанизированных районах. Были рассмотрены города, которые в последнее время часто подвергались наводнениям и подтоплениям: Каир (Египет), Горакхпура (Индия), Дрезден (Германия), Стамбул (Турция), Дакка (Бангладеш). Спутниковые изображения позволили получить ценную информацию для урбанизированных территорий, пространственных зон, растительного покрова, пространственного распределения домашних хозяйств и населения, которым наводнения часто причиняют вред. Такие наборы данных также использовали для анализа опасности возникновения наводнений и оценки уязвимости пространственных зон.

В работе [90] особое внимание уделяется оценке потерь из-за наводнений в сельском хозяйстве:

потери урожая из-за наводнения =
*= стоимость урожая * фактор повреждения,*
*стоимость урожая = собранный урожай*стоимость,*
фактор повреждения = f(размер урожая; месяц возникновения неблагоприятного события; продолжительность наводнения).

Авторы разработали модель оценки потерь для сельскохозяйственных культур с использованием данных дистанционного зондирования и других вспомогательных данных. Модель была апробирована для реки Гавел в Германии. Было показано, что данные дистанционного зондирования позволяют улучшить оценку потерь от паводков, хотя по-прежнему существует неопределенность при прогнозировании урожая и моделировании потенциальных потерь.

В работе [92] представлена математическая модель убытков для разных видов землепользования, которая также базируется на спутниковых данных. Например, для выращивания сельскохозяйственных культур модель имеет такой вид:

$$AD(i,j) = \sum_{k=1}^{n} \left[D_m(i,j,k) CRP_a(i,j,k) mn(k) \right],$$

$$D_m = CP_k \; Y_k \; DC_k(i,j),$$

где AD — общий ущерб, нанесенный посевам наводнением; n — количество типов разных сельскохозяйственных культур; D_m — повреждение посевов вследствие наводнения; CRP_a — площадь посевных территорий; mn — фактор повреждения, зависящий от времени; CP_k — стоимость единицы посевов; Y_k — урожайность; DC_k — функция повреждений.

Отметим, что функция повреждений зависит не только от глубины затопления, но и от времени, в течение которого соответствующая культура находилась под водой (рис. 1.3).

Оценка вероятности и риска наводнений. Для анализа риска наводнений необходимо решить задачу оценивания плотности распределения вероятности наводнения. Как правило, для ее решения применяют гидравлические модели, позволяющие проанализировать различные сценарии затоплений. Здесь спутниковые данные используют для калибровки и валидации моделей, а также ассимиляции для уменьшения неопределенности (дисперсии) оценок. В работе [100] проанализировано три гидрологические модели (HEC-RAS, LISFLOOD-FP и TELEMAC-2D) для прогнозирования границ затопленных территорий. Для оценки качества моделей прогноз-

Рис. 1.3. Функция потерь для бобовых культур в зависимости от времени пребывания под водой и глубины затопления, м [92]: *1* — 0—0,5; *2* — 0,5—1; *3* — >1

ные значения сравнизаются с наземными наблюдениями, полученными на гидрологических постах, и картами затопленных территорий, построенными по радиолокационным изображениям Radarsat-1 и ERS-2. При этом для картографирования затопленных территорий используют методы контуров [110] и пороговой сегментации. Для сравнения данных моделирования и спутниковых наблюдений применяют F-меру:

$$F = \mathrm{Num}(S_{mod} \cap S_{sat}) \,/\, \mathrm{Num}(S_{mod} \cup S_{sat}), \tag{1.18}$$

где S_{mod}, S_{sat} — множества пикселов, которые определены как затопленные в результате моделирования и обработки спутниковых данных; Num — количество элементов множества.

В роботах [101, 102] расширен подход, использованный в [100] для учета неопределенностей как в моделях, так и спутниковых данных. В частности, прогнозирование затопленных территорий осуществляют с помощью ансамбля прогнозов. При этом каждому элементу ансамбля ставится в соответствие весовой коэффициент, зависящий от качества сопоставления со спутниковыми данными:

$$L_k = \frac{F_k - \min_k(F_k)}{\max_k(F_k) - \min_k(F_k)}, \tag{1.19}$$

$$F = \frac{A - B}{A + B + C}, \tag{1.20}$$

где F — модифицированный вариант меры (1.18); k — номер элемента ансамбля; A — размер области (количество пикселов), которая была правильно спрогнозирована моделью как затопленная в отличие от спутниковых данных; B — размер области, которая ошибочно спрогнозирована как затопленная (ошибка первого рода); C — размер области, которая ошибочно спрогнозирована как незатопленная (ошибка второго рода); значения $\min_k$ и $\max_k$ берутся по всему ансамблю. Соответственно выход модели для элемента территории (i, j) определяют как взвешенное среднее по ансамблю:

$$C_{ij} = \frac{\sum_k L_k w_{ij}^k}{\sum_k L_k},$$

где w_{ij}^k — значение выхода модели для k-го ансамбля ($w_{ij}^k = 1$ для затопленных территорий, 0 — для незатопленных).

В работе [103] проанализированы возможности получения спутниковых данных в режиме времени, близкому к реальному (NRT — near real time), для быстрой настройки и калибровки гидрометеорологической модели. Данные спутника Envisat/ASAR со средним пространственным разрешением (150 м) получены на протяжении 24 ч после съемки и использованы для повторной калибровки модели. Авторы показали, что калибровка модели только по наземным данным не позволила корректно спрогнозировать наводнение, а для улучшения ее прогнозных возможностей нужно применять иные геопространственные данные.

В работе [104] предложен подход, в рамках которого построение и калибровка гидрометеорологической модели осуществляется лишь на основе

спутниковых данных и продуктов. Такой подход особенно важен для тех регионов, где отсутствуют или недоступны наземные наблюдения. Исследования проводились для модели CREST (Coupled Routing and Excess Storage) для бассейна озера Виктория в Африке. Настройку модели осуществляли с использованием данных MODIS и ASTER, а также соответствующих продуктов оценки осадков, температуры, карт землепользования, затопленных территорий, топографических карт и др. Для калибровки модели по спутниковым данным применяли F-меру (1.18). Была проиллюстрирована возможность настройки модели на основе только спутниковых данных.

В работах [29—31, 118] спутниковые данные вместе с цифровой высокоточной моделью рельефа использовали для оценки уровня воды на затопленных территориях для последующей калибровки модели и ассимиляции дополнительных данных. Так, в [29] калибровка гидрологической модели LISFLOOD-FP осуществляется не по карте затопленных территорий, а по уровню воды. При этом в качестве меры используется статистическая гипотеза (t-статистика) о том, что разница между спрогнозированным уровнем и уровнем, полученным на основе спутниковых данных, будет превышать некоторый заданный порог $P(t>|t_0|)$. Авторы показали, что такая мера является более чувствительна, чем F-мера (1.18).

В работе [30] значение уровня воды, полученное с помощью спутниковых данных, последовательно (в процессе съемки) ассимилируется в гидрологическую модель LISFLOOD-FP. При этом для ассимиляции использован модифицированный фильтр Калмана (EnKF). Показано, что с помощью спутниковых данных можно улучшить качество прогнозирования. Для ассимиляции значения уровня воды в гидрологическую модель HEC-RAS в роботах [31, 118] применен фракционный фильтр (или последовательный метод Монте-Карло), который в отличие от фильтра Калмана не основывается на гауссовском распределении ошибок. Авторы показали, что использование процедуры ассимиляции позволяет уменьшить дисперсию ошибок прогнозирования в 1,5—3 раза.

Использование гидрологических моделей обусловлено неопределенностями, возникающими в результате частичного отсутствия данных, необходимых для их запуска, калибровки и валидации, а также ненадежности данных и разных способов их интерпретации [101].

Еще одним подходом, дополняющим существующие модели, является ансамблевый подход, при котором для восстановления плотности распределения вероятности наводнения анализируется информация из разных источников. В работах [93, 119] прогнозирование уровня воды осуществляется путем объединения выходов нейросетевой модели, моделей на основе нечеткой логики, а также статистической и гидрологической моделей TOPMODEL. При этом проанализировано шесть разных подходов к получению общего результата:

- арифметическое усреднение результатов прогнозирования разных моделей;
- выбор наилучшего (наиболее вероятного) прогноза среди разных моделей;

• объединение абсолютных значений выходов разных моделей с использованием нейронной сети. Нейронная сеть обучалась для прогнозирования состояния реки на 1 или 6 ч вперед;

• объединение относительных значений выходов разных моделей с использованием нейронной сети. Нейронная сеть обучалась для прогнозирования изменения состояния реки на 1 или 6 ч вперед;

• комбинация выходов отдельных моделей на основе правил нечеткой логики для абсолютных текущих значений;

• комбинация на базе правил нечеткой логики для абсолютных текущих значений и ошибки, полученной на текущем шаге прогнозирования.

Показано, что точность прогнозирования ансамблевой архитектуры выше, чем каждой модели в отдельности, в среднем в 1,5—3 раза в зависимости от тестовых регионов.

Спутниковые изображения можно непосредственно использовать для построения карт оценки риска наводнений. В [22, 94] предложен метод оценивания риска для отдельного события (наводнения), основанный на использовании ансамбля классификаторов при обработке радиолокационных спутниковых данных. В частности, были применены такие методы:

• визуальная интерпретация изображения;

• пороговая сегментация;

• сегментация на основе дисперсии;

• сегментация на основе евклидовой нормы;

• метод активных контуров [110].

Эти методы применяются для обработки двух радиолокационных изображений, полученных спутниками ERS-2/SAR и Envisat/ASAR. При этом полученные карты объединяют по формуле [22]

$$PI_i = \frac{\sum_{j=1}^{5} \omega_j (P_{j,SAR})_i + \sum_{k=1}^{5} \omega_k (P_{k,ASAR})_i}{\sum_{j=1}^{5} \omega_j + \sum_{k=1}^{5} \omega_k}. \qquad (1.21)$$

Тут значение вероятности PI вычисляют для каждого пиксела i, а весовые коэффициенты ω — в соответствии с F-мерой (1.20). При этом в качестве базового последовательно берется каждое спутниковое изображение

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i^{D_1 M_1} - \sum_{i=1}^{n} P_i^{D_0 M_1}}{\sum_{i=1}^{n} P_i^{D_1 M_1} + \sum_{i=1}^{n} P_i^{D_0 M_1} + \sum_{i=1}^{n} P_i^{D_1 M_0}}, \qquad (1.22)$$

где ω_j находят, когда изображение $ASAR$ считается базовым (обозначено D), а изображение SAR — тестовым (обозначено M). Соответственно, ω_k вычисляют в обратной ситуации: когда изображение $ASAR$ — тестовое (M), а SAR — базовое (D). Мера P_i^{DM} показывает степень соответствия между картой затоплений на базовом и тестовом изображениях (1 соответствует

затопленным территориям, а 0 — суше). Например, $\sum_{i=1}^{n} P_i^{D_0 M_1}$ — это количество пикселов, которые определены как незатопленные на базовом изображении и затопленные на тестовом (ошибка первого рода). В свою очередь, значение $\sum_{i=1}^{n} P_i^{D_1 M_0}$ является ошибкой второго рода.

Таким образом, для каждого пиксела изображения вычисляют вероятность затопления (1.22), которую умножают на значение функции ущерба для получения риска. В работе рассмотрены такие категории ущерба (причем рассматривают не абсолютный ущерб, а относительный): дома, дороги и железная дорога, другие инфраструктурные объекты водные объекты и т.п. Следует отметить, для оценки вероятности затопления существенным является использование двух спутниковых изображений, полученных в одно и то же время. А это не всегда осуществимо.

В работе [91] вероятность наводнения оценивается на основе анализа частоты затопления территории с использованием трех изображений. При этом риск может быть отнесен к одной из следующих категорий: высокий (территория затоплена на всех трех изображениях), средний (на двух), низкий (на одном) и неповрежденная территория. Полученная карта вероятности сравнивается с картой глубины затоплений, полученной в процессе гидрологического моделирования. Показано, что карты совпадают на 98 %.

1.3.2. Анализ рисков засух на основе спутниковых данных

Методы картографирования засух на основе спутниковых данных. Спутниковые данные предоставляют новые возможности для мониторинга и картографирования засух. В [120] предложен метод RFE (Rainfall Estimate) оценивания осадков для территории Африки. Этот метод основывается на использовании параметров облачного покрова, полученных с помощью спутниковых наблюдений и незначительной сети наземных станций. В [121] предложен индекс *WRSI* (Water Requirement Satisfaction Index), который определяется как отношение значения фактической сезонной эвапотранспирации и сезонной потребности посевов в воде. Основные входные параметры для определения индекса *WRSI* — осадки, которые оцениваются на базе данных RFE, и потенциальная эвапотранспирация, оцениваемая в процессе моделирования.

В целом, индексы засух на основе спутниковых данных можно разделить на такие группы [95]:

а) индексы на базе состояния растительности, основанные на комбинациях спектральных каналов в оптическом диапазоне;

б) индексы на базе яркостной температуры суши, основанные на использовании информации в термальном спектре;

в) на основе комбинации индексов, приведенных в пп. а, б.

Индекс *NDVI* [122] позволяет оценить фотосинтетическую активную биомассу растений. Его рассчитывают по формуле

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \tag{1.23}$$

где ρ_{NIR} и ρ_{RED} — коэффициенты отражения соответственно в близкой ИК и красной областях спектра электромагнитного излучения.

Дальнейшим развитием индекса *NDVI* является индекс *VCI* [54]:

$$VCI = 100 \cdot \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}, \tag{1.24}$$

где $NDVI_{\min}$ и $NDVI_{\max}$ — минимальные и максимальные значения *NDVI*, полученные в результате многолетних рядов данных.

В работе [53] определено, что индекс *VCI* имеет высокую взаимосвязь с водным дефицитом и осадками. Недостатком индекса *NDVI* является его насыщение в областях со значительной биомассой. Для его преодоления был предложен индекс *EVI* (Enhanced Vegetation Index) [123]:

$$EVI = G \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1\rho_{RED} - C_2\rho_{BLUE} + L}, \tag{1.25}$$

где ρ_{NIR}, ρ_{RED}, ρ_{BLUE} — коэффициенты отражения соответственно в близкой ИК, красной и синей областях спектра электромагнитного излучения; L — коэффициент, который компенсирует яркость грунта; C_1 и C_2 — коэффициенты, связанные с атмосферными явлениями; G — коэффициент усиления. Например, для данных MODIS приняты такие значения параметров: $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7{,}5$, $G = 2{,}5$.

Во второй группе индексов наиболее популярным является индекс *TCI*:

$$TCI = 100 \cdot \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}}, \tag{1.26}$$

где T — значение яркостной температуры; $T_{\min}$ и $T_{\max}$ — минимальные и максимальные значения яркостной температуры, полученные на основе многолетних рядов данных.

Индекс *VHI* принадлежит к третьей группе и является линейной комбинацией индексов *VCI* (1.24) и *TCI* (1.26):

$$VHI = \alpha VCI + (1{,}26 - \alpha) TCI. \tag{1.27}$$

Как видно из табл. 1.2, значения индекса *VHI* соответствуют разным категориям засух.

Оценивание убытков, причиненных засухами, на основе спутниковых данных. Наиболее применяемый подход к оцениванию косвенных убытков, причиненных засухами, — прогнозирование урожайности. Это связано с тем, что засухи однозначно влияют на продуктивность сельскохозяйственных культур, а недостаток воды приводит к уменьшению биомассы и, соответственно, к потерям урожая (убыткам).

Для прогнозирования урожайности применяются два наиболее распространенных подхода: с использованием эмпирических регрессионных моделей и биофизических моделей роста растений. Эмпирические модели связывают урожайность с некоторыми предикторами (например, характеристиками биомассы, получаемыми с помощью спутниковых данных, метеорологическими параметрами) и, как правило, не требуют больших объемов входных данных. Такие модели достаточно просты в реализации, но недостаточно надежны. В значительной мере их эффективность зависит от наличия и качества данных. В работе [124] предложена обобщенная регрессионная модель для прогнозирования урожайности озимой пшеницы, которая первоначально была построена и верифицирована для штата Канзас (США), а затем без дополнительной адаптации использована для прогнозирования урожайности в Украине. По сравнению с официальной статистикой эта модель обеспечивает прогноз урожайности озимой пшеницы в Украине с погрешностью 10 %.

Биофизические модели роста сельскохозяйственных культур позволяют получать такие параметры посевов, как биомасса, содержимое воды и др. К данному классу принадлежит модель WOFOST (World Food Studies) [125, 126], которую используют в европейской системе мониторинга сельскохозяйственных культур CGMS (Crop Growth Monitoring System), а также модели EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) [127] и CERES (Crop Environment Resource Synthesis) [128]. Основные трудности применения таких моделей заключаются в том, что они требуют многочисленных входных параметров для запуска модели, в частности, информацию о типе грунта, сортах культур, метеорологических данных, агротехнологий (сроки посева, фазы цветения, молочной зрелости и др.). Хотя эти модели достаточно надежны, их применение для конкретного региона требует соответствующей адаптации и калибровки.

Спутниковые данные играют важную роль в прогнозировании урожайности, поскольку они являются источником своевременной и объективной информации для больших территорий. Для повышения эффективности моделей роста растений в них можно ассимилировать спутниковые продукты, такие как лиственный индекс *LAI* (Leaf Area Index), вегетационные индексы *NDVI* и *EVI*, метеорологические параметры, получаемые со спутников Meteosat и NOAA-AVHRR [129—135]. Так, в работе [131] для ассимиляции индекса *LAI* в модель роста WOFOST применяли два подхода (фильтр Калмана и повторная калибровка). В данной работе предложено понятие эффективности ассимиляции (Assimilation Efficiency — *AE*), которую определяют как отношение относительных средних абсолютных ошибок с ассимиляцией ($RMAE_{TA}$) и без нее ($RMAE_{TO}$):

$$AE = 100(1 - RMAE_{TA} / RMAE_{TO}). \qquad (1.28)$$

В [131] показано, что использование спутниковых данных позволяет получить значение *AE* до 50—60 в зависимости от частоты ассимиляции индекса *LAI* и периода развития посевов.

Полученные на основе спутниковых данных биофизические параметры можно также использовать в качестве предикторов в эмпирических регрес-

сионных моделях. В частности, в работах [124, 136—141] рассмотрены вопросы применения вегетационного индекса *NDVI* и индекса здоровья растительности *VHI* для прогнозирования урожайности.

Количественное оценивание повреждений посевов вследствие засух является достаточно сложной задачей. Использование такого подхода в операционном режиме на основе наземных измерений ресурсоемко и экономически невыгодно. Применяя спутниковые данные, можно интерполировать точечные значения повреждений на всю территорию. Так, в работе [142] для решения этой задачи используют вегетационный индекс *NDVI* и регрессионную модель для определения поврежденных культур вследствие засух. Для каждого поля (базируясь на векторных данных о границах полей) вычисляли среднее значение *NDVI*, которое применяли в качестве переменной для определения степени повреждений *EDP* (Estimated Damage Percent):

$$EDP = 88 - 0{,}22NDVI.$$

В [9] предложен новый подход для оценивания повреждений из-за засух, основанный на технологии интеграции («слияния») спутниковых данных разного пространственного разрешения, векторных данных о границах полей и данных наземных измерений. При этом спутниковые изображения классифицируются для получения карт сельскохозяйственных культур и карт повреждений. При этом классификацию выполняют интегрируя спутниковые данные низкого и высокого пространственного разрешения на основе методов машинного обучения. Полученные карты интегрируются с векторной информацией о границах полей для нахождения обобщенной карты повреждений.

Оценка вероятности и риска засух на основе спутниковых данных. Традиционный подход к оцениванию рисков засух — использование точечных метеорологических наблюдений, применение теории экстремальных величин [143] и интерполяция полученных результатов на другие регионы с использованием пространственной регрессии [96] или методологии кригинга (kriging) [144]. Например, в работе [96] для определения вероятности наступления засухи использовали модель Poisson-GP для экстремальных (минимальных) значений осадков. В такой модели пуассоновский процесс применяют для моделирования «поступления» экстремальных значений, а обобщенное распределение Парето — для моделирования величин, которые превышают некоторый заданный порог. Такую модель необходимо построить для каждой метеостанции отдельно.

Для оценки значений для участков, для которых наземные наблюдения отсутствуют, используют такую модель:

$$z(x) = b_0 + b_1P_1 + \ldots + b_nP_n,$$

где z — значение параметра в точке x; b_i — коэффициенты регрессии; P_i — независимые переменные. В качестве переменных в работе [96] принимали широту и долготу, среднюю высоту и крутизну склона, среднее значение солнечной радиации и т.п. Значение коэффициента детерминации регрессии для разных параметров модели Poisson-GP варьировали от 0,516 до 0,858.

Отметим, что для анализа компонентов риска, в частности, вероятности потерь, в большинстве работ используют спутниковые данные. Количественный анализ риска засух изучен гораздо меньше.

В работе [56] с использованием индекса *VHI* и климатических параметров (температуры, осадков) проанализирована динамика засух на глобальном уровне, а также оценена площадь засух разных категорий (1.2). Определено, что с 2000 г. на 17—35 % общей площади суши наблюдалась значительная засуха, 7—15 % — экстремальная и 2—6 % — чрезвычайная. Для территории Украины существенный тренд увеличения площади засух за последние 10 лет не был выявлен, хотя по наблюдениям метеостанций температура за последние 50 лет возросла на 1,45 °С (вдвое больше глобальной оценки). Очевидно, это объясняется тем, что количество осадков увеличилось на 40 мм.

В работе [97] для оценивания риска засух применяли подход на основе теории экстремальных величин и спутниковых данных. В частности, использовали индекс *NDVI*, вычисленный по данным SPOT-VEGETATION с пространственным разрешением 1 км. Такой информационный продукт доступен каждые 10 дней за период 1998—2009 гг. В качестве исследуемой переменной выбрано значение аномалии *NDVI* — отклонения от многолетнего среднего:

$$ADVI(y, p) = NDVI(y, p) - \mu(p), \tag{1.29}$$

где $\mu(p) = 1/N\sum_{y=1}^{N} NDVI(y, p)$; y — год; p — декада.

В [97] для моделирования экстремальных значений аномалий исследовали две модели:

- обобщенное распределение экстремальных величин (GEV — Generalized Extreme Value):

$$G(z) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\}; \tag{1.30}$$

- обобщенное распределение Парето (GP — Generalized Pareto):

$$H(y) = 1 - \left(1 + \frac{y\xi}{\sigma}\right)^{-1/\xi}, \tag{1.31}$$

где μ — параметр сдвига; σ — параметр масштаба; ξ — параметр формы.

Для оценки параметров распределений в случае GEV использовали минимумы «блоков» (по месяцам), а в случае GP — данные, которые превышают некоторый порог. Полученные результаты свидетельствовали о лучшем качестве модели GEV. На ее основе определены периоды повторяемости минимумов аномалий для Эфиопии. При этом задача количественной оценки потенциальных убытков и соответственно рисков в работе не рассматривается.

1.4. ВЫВОДЫ

Проанализированы существующие подходы к оцениванию риска естественных чрезвычайных ситуаций на основе спутниковых данных. Основное внимание сосредоточено на гидрометеорологических явлениях (наводнениях и засухах), поскольку они представляют собой значительную часть стихийных бедствий и причиняют наибольший ущерб. Результаты анализа показали, что спутниковые данные предоставляют новые возможности мониторинга и оценивания риска естественных ЧС:

- покрытие больших территорий;
- получение объективной информации;
- обеспечение повторяемости измерений как в пространстве, так и во времени;
- обеспечение оперативности получения информации;
- поддержка всего цикла предотвращения стихийных бедствий;
- ассимиляция данных в прогнозные модели для уменьшения неопределенностей.

При этом можно выделить следующие подзадачи, которые необходимо решить для количественного оценивания риска:

1. Идентификация (картографирование) ЧС.
2. Определение вероятности наступления ЧС.
3. Оценивание потенциальных убытков из-за наступления ЧС.
4. Оценивание риска ЧС в соответствии с принятыми мерами.
5. Разработка технологий для операционного оценивания рисков.

Спутниковые данные и геоинформационные технологии можно использовать для повышения качества и эффективности решения каждой из этих подзадач. Так, спутниковые изображения являются де-факто единственным источником информации для операционного картографирования ЧС на региональном и глобальном уровнях. На сегодня накоплены большие архивы спутниковых изображений, которые можно статистически обработать для оценки вероятности наступления ЧС. Кроме того, ассимиляция в прогнозные модели параметров, полученных на основе спутниковых наблюдений, например, уровня воды, биофизических параметров растительности и т.д., позволяет уменьшить неопределенность прогноза. Спутниковые данные можно эффективно применять для оценки убытков от ЧС.

В настоящее время в большинстве работ спутниковые данные используют для решения одной из приведенных выше подзадач. Практически отсутствуют работы, в которых их комплексно применяют для количественного анализа рисков. Кроме того, в большинстве работ не ставится задача оценки эффективности использования спутниковых данных для данной предметной области.

В данной монографии на примере наводнений и засух представлена комплексная методология использования спутниковых данных для решения приведенных подзадач, связанных с количественной оценкой рисков ЧС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное общество становится все более техногенным и зачастую разрушающе воздействующим на окружающую среду. В связи с этим появилось множество новых вызовов, обусловленных резким повышением рисков человеческих потерь, а также нарушением производственной и социальной инфраструктуры.

Еще одна современная тенденция — увеличение количества источников данных наблюдения Земли, основанных на использовании как космических систем, так и наземных сетей наблюдений. На сегодняшний день в распоряжении специалистов имеется большой набор разнородных данных в самых различных областях, которые характеризуются значительным объемом и высокой частотой измерений. Использование результатов, полученных в последнее время, совместно с современными научными методами позволяет решать задачи оценки рисков и анализа ущерба на качественно новом уровне. Решению этих задач и посвящена данная работа.

Целью многолетних исследований авторов было развитие соременной научной методологии для решения актуальных задач анализа рисков, связанных со стихийными бедствиями. Авторам удалось построить «мостик» между существующими общеметодологическими (теоретическими) наработками и получением количественных оценок риска на основе накопленных данных (измерений) различной природы. Проблему оценки рисков решали с точки зрения индуктивного подхода, отталкиваясь от имеющихся данных, с привлечением современных методов интеллектуальных геопространственных вычислений.

По мнению авторов, на основе приведенных подходов и методов можно эффективно решать ряд важных с практической точки зрения задач: получение геопространственного распределения зон риска, оценивание связанного с ними потенциального и реального ущерба и др. Особенностью выполненной работы является то, что предложенные методы основаны на использовании всех известных в настоящее время источников информации; методы реализованы в виде набора информационных технологий, позволяющих строить специализированные информационные системы с учетом всех современных подходов к эффективной обработке больших объемов данных, таких как Grid-компьютинг, облачные и параллельные вычисления, использование сервис-ориентированных архитектур и др.

Вследствие продолжающегося глобального мирового экономического кризиса в ООН и других межгосударственных объединениях ограничены

возможности по нейтрализации современных угроз человечеству, поэтому ответственность за восстановление регионов зачастую лежит на правительствах конкретных стран. В сложившейся ситуации решать все актуальные задачи можно лишь за счет повышения эффективности мониторинга чрезвычайных ситуаций и привлечения всех доступных источников данных.

Авторы не претендуют на исчерпывающее решение поставленной проблемы, а полагают, что работа дает толчок новым направлениям как фундаментальных, так и прикладных исследований. В частности, разработанные методы и технологии геопространственного анализа рисков стимулируют развитие методов геопространственной статистики, анализа данных, геопространственного интеллекта. Вместе с тем геопространственный характер обрабатываемой информации требует развития высокопроизводительных вычислений, эффективных технологий визуализации и так называемого «картографирования» рисков. Авторы надеются, что эти методы и технологии получат достойное развитие в последующих работах украинских авторов, а также в международных проектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aschbacher J.* The European Earth monitoring (GMES) programme: Status and perspectives / J. Aschbacher, M. Milagro-Perez // Remote Sens. Environ. — 2012. — **120**. — P. 3—8.

2. *Vapnik V.* Statistical Learning Theory / V. Vapnik. — New York : Wiley, 1998. — 740 p.

3. *Haykin S.* Neural Networks. A comprehensive Foundation / S. Haykin. — New Jersey: Prentice Hall, 1994. — 768 p.

4. *Bishop C. M.* Pattern Recognition and Machine Learning / C. M. Bishop. — New York: Springer Science + Business Media, 2006. — 738 p.

5. *Zhang J.* Multi-source remote sensing data fusion: status and trends / J. Zhang; Int. J. Image and Data Fusion. — 2010. — **1(1)**. — P. 5—24.

6. *Mitchell H. B.* Multi-sensor Data Fusion — An Introduction / H. B. Mitchell. — Berlin : Springer-Verlag, 2007. — 282 p.

7. *Das S.* High-Level Data Fusion / S. Das. — Norwood, MA: Artech House Publishers, 2008. — 373 p.

8. *Hluchy L.* The Data Fusion Grid Infrastructure: Project Objectives and Achievements / L. Hluchy, N. Kussul, A. Shelestov [et al.] // Comput. Inform. — 2010. — **29(2)**. — P. 319—334.

9. *Шелестов А. Ю.* Информационная технология оценки ущерба от засухи на основе слияния данных / А. Ю. Шелестов, Б. Я. Яйлимов, А. И. Петухова // Пр. ДонНТУ. Сер. «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». — 2013. — № 1 (17). — С. 125—132.

10. *Хміль Г. А.* Концепція управління ризиками надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру. Проект [Електронний ресурс] / Г. А. Хміль, Є. П. Журавльов, В. В. Гетьман, В. В. Бегун. — Режим доступу: http://www.mns.gov.ua/content/education_kurns.html.

11. *Bankoff G.* Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People / G. Bankoff, G. Frerks, D. Hilhorst. — 2nd ed. — London : Routledge, 2003. — 496 p.

12. *Joyce K. E.* A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters / K. E. Joyce, S. E. Belliss, S. V. Samsonov [et al.] // Progr. Phys. Geogr. — 2009. — **33(2)**. — P. 183—207.

13. *Gillespie T. W.* Assessment and prediction of natural hazards from satellite imagery / T. W. Gillespie, J. Chu, E. Frankenberg, D. Thomas // Ibid. — 2007. — **31**. — P. 459—470.

14. *Guha-Sapir D.* Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends / D. Guha-Sapir, F. Vos, R. Below, S. Ponserre. — Brussels: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2012. — 42 p.

15. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2012 році [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.mns.gov.ua/content/nasdopovid2012.html.

16. *Качинський А. Б.* Безпека, загрози та ризик / А. Б. Качинський. — Київ : НА СБ України, 2004. — 471 с.

17. *Mostert E.* The European flood risk directive: challenges for research / E. Mostert, S.J. Junier // Earth Syst. Sci. Discuss. — 2009. — **6(4)**. — P. 4961—4988.

18. *Kussul N.* Disaster Risk Assessment Based on Heterogeneous Geospatial Information / N. Kussul, B. Sokolov, Y. Zyelyk [et al.] // J. Autom. Inform. Sci. — 2010. — **42(12)**. — P. 32—45.

19. *Куссуль Н.* Геопространственный анализ рисков на основе слияния данных / Н. Куссуль, Я. Зелык, С. Скакун, А. Шелестов // Соврем. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2010. — **7**, № 2. — С. 55—66.

20. *Voigt S.* Satellite image analysis for disaster and crisis management support / S. Voigt, T. Kemper, T. Riedlinger [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2007. — **45(6)**. — P. 1520—1528.

21. *Kussul N. N.* Determination of inundated territories on the basis of integration of heterogeneous data / N. N. Kussul, E. A. Lupian, A. Y. Shelestov [et al.] // J. Autom. Inform. Sci. — 2007. — **39(12)**. — P. 42—51.

22. *Schumann G.* The Utility of Spaceborne Radar to Render Flood Inundation Maps Based on Multialgorithm Ensembles / G. Schumann, G. Di Baldassarre, P. D. Bates // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2009. — **47(8)**. — P. 2801—2807.

23. *Skakun S.* A Neural Network Approach to Flood Mapping Using Satellite Imagery / S. Skakun // Comput. Inform. — 2010. — **29(6)**. — P. 1013—1024.

24. *Pulvirenti L.* Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation / L. Pulvirenti, M. Chini, N. Pierdicca, L. Guerriero, P. Ferrazzoli // Remote Sens Env. — 2011. — **115(4)**. — P. 990—1002.

25. *Kuenzer C.* Flood Mapping and Flood Dynamics of the Mekong Delta: ENVISAT-ASAR-WSM Based Time Series Analyses / C. Kuenzer, H. Guo, J. Huth [et al.] // Remote Sensing. — 2013. — **5(2)**. — P. 687—715.

26. *Chien S.* Monitoring Flooding in Thailand Using Earth Observing One in a Sensorweb / S. Chien, J. Doubleday, D. Mclaren [et al.] // IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. — 2013. — **6(2)**. — P. 291—297.

27. *Schumann G.* Conditioning water stages from satellite imagery on uncertain data points / G. Schumann, P. Matgen, F. Pappenberger // IEEE Geosci. Remote Sens Lett. — 2008. — **5**. — P. 810—813.

28. *Matgen P.* Integration of SAR-derived inundation areas, high precision topographic data and a river flow model toward real-time flood management / P. Matgen, G. Schumann, J. Henry [et al.] // Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf. — 2009. — **3**. — P. 247—263.

29. *Mason D. C.* Calibration of uncertain flood inundation models using remotely sensed water levels / D. C. Mason, P. D., J. T. Dall'Amico // J. Hydrol. — 2009. — **368**. — P. 224—236.

30. *Garcia-Pintado J.* Scheduling satellite-based SAR acquisition for sequential assimilation of water level observations into flood modelling / J. Garcia-Pintado, J. C. Neal, D. C. Mason [et al.] // Ibid. — 2013. — **495**. — P. 252—266.

31. *Giustarini L.* Assimilating SAR-derived water level data into a hydraulic model: a case study / L. Giustarini, P. Matgen, R. Hostache [et al.] // Hydrol. Earth Syst. Sci. — 2011. — **15**. — P. 2349—2365.

32. *Lecca G.* Grid computing technology for hydrological applications / G. Lecca, M. Petitdidier, L. Hluchy [et al.] // J. Hydrol. — 2011. — **403(1-2)**. — P. 186—199.

33. *Kussul N.* Grid and sensor web technologies for environmental monitoring / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun // Earth Sci. Inform. — 2009. — **2(1-2)**. — P. 37—51.

34. *Kussul N.* Service-oriented infrastructure for flood mapping using optical and SAR satellite data / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, Li Guoqing, O. Kussul, Xie Jibo // Int. J. Digital Earth. — 2013. — doi:10.1080/17538947.2013.781242.

35. *Cossu R.* Near real-time SAR-based processing to support flood monitoring / R. Cossu, E. Schoepfer, P. Bally, L. Fusco // J. Real-Time Image Proc. — 2009. — **4**. — P. 205—218.

36. *Di Baldassarre G.* Timely low resolution SAR imagery to support floodplain modelling: a case study review / G. Di Baldassarre, G. J.-P. Schumann, L. Brandimarte, P. D. Bates // Surv. Geophys. — 2011. — **32**. — P. 255—269.

37. *Heim Jr. R. R.* A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States / R. R. Heim // Bul. the Amer. Meteorological Society. — 2002. — **83(8)**. — P. 1149—1165.

38. *Mishra A. K.* A review of drought concepts / A. K. Mishra, V. P. Singh // J. Hydrol. — 2010. — **391(1)**. — P. 202—216.

39. *Dai A.* Drought under global warming: a review / A. Dai // Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. — 2011. — **2(1)**. — P. 45—65.

40. *Wilhite D. A.* Drought: A Global Assessment / Wilhite D. A. — **1**. — New York : Routledge, 2000. — P. 89—104.

41. *Palmer W. C.* Meteorological drought / W. C. Palmer // Weather Bureau Res. Pap. — 1965. — **45**. — 58 p.

42. *Guttman N. B.* Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index / N. B. Guttman // JAWRA J. Amer. Water Resources Assoc. — 1998. — **34(1)**. — P. 113—121.

43. *Alley W. M.* The Palmer drought severity index: limitations and assumptions / W. M. Alley // J. Climate and Appl. Meteorology. — 1984. — **23(7)**. — P. 1100—1109.

44. *McKee T. B.* Drought Monitoring with Multiple Time Scales / T. B. McKee, N. J. Doesken, J. Kliest // Proc. 9th AMS conf. on Appl. Climatology, 15—20 January, 1995. — Dallas; Texas. 1995. — P. 233—236.

45. *Palmer W. C.* Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index / W. C. Palmer // Weatherwise. — 1968. — **21**. — P. 156—161.

46. *Shafer B. A.* Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas / B. A. Shafer, L. E. Dezman. — Reno, NV : Colorado State University, 1982. — P. 164—175.

47. *Svoboda M.* An introduction to the Drought Monitor / M. Svoboda // Drought Network News. — 2000. — **12**. — P. 15—20.

48. *Sorooshian S.* Advanced Concepts on Remote Sensing of Precipitation at Multiple Scales / S. Sorooshian, A. Aghakouchak, P. Arkin [et al.] // Bul. the Amer. Meteorological Society. — 2011. — **92(10)**. — P. 1353—1357.

49. *Kuligowski R. J.* A self-calibrating real-time GOES rainfall algorithm for short-term rainfall estimates / R. J. Kuligowski // J. Hydrometeorology. — 2002. — **3(2)**. — P. 112—130.

50. *Huffman G. J.* The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) / G. J. Huffman, R. F. Adler, D. T. Bolvin, E. J. Nelkin // M. Gebremichael, F. Hossain. Satellite rainfall applications for surface hydrology. — Heidelberg : Springer, 2010. — P. 3—22.

51. *Anderson M. C.* An Intercomparison of Drought Indicators Based on Thermal Remote Sensing and NLDAS-2 Simulations with U.S. Drought Monitor Classifications / M. C. Anderson, C. Hain, J. Otkin [et al.] // J. Hydrometeorology. — 2013. — **14**. — P. 1035—1056.

52. *Sandholt I.* A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status / I. Sandholt, K. Rasmussen, J. Andersen // Remote Sensing of Environment. — 2002. — **79(2)**. — P. 213—224.

53. *Liu W. T.* Monitoring regional drought using the vegetation condition index / W. T. Liu, F. N. Kogan // Int. J. Remote Sens. — 1996. — **17**. — P. 2761—2782.

54. *Kogan F.* Global drought watch from space / F. Kogan // Bul. Amer. Meteorological Society. — 1997. — **78**. — P. 621—636.

55. *Kogan F.* World droughts from AVHRR-based vegetation health indices / F. Kogan // EOS, Trans. American Geophys. Union. — 2002. — **83**. — P. 557—564.

56. *Kogan F.* Global and regional drought dynamics in the climate warming era / F. Kogan, T. Adamenko, W. Guo // Remote Sens. Lett. — 2013. — **4(4)**. — P. 364—372.

57. *Щербенко Е. В.* Дистанционные методы выявления сельскохозяйственной засухи / Е. В. Щербенко // Совр. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2007. — **2**, вып. 4. — С. 408—419.

58. *Giglio L.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS / L. Giglio, J. Descloitres, C. O. Justice, Y. J. Kaufman // Remote Sensing of Environment. — 2003. — **87(2)**. — P. 273—282.

59. *Roy D. P.* Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data—A bi-directional reflectance model-based expectation approach / D. P. Roy, P. E. Lewis, C. O. Justice // Remote Sensing of Environment. — 2002. — **83(1)**. — P. 263—286.

60. *Roy D. P.* Characterizing the surface heterogeneity of fire effects using multitemporal reflective wavelength data / D. P. Roy, T. Landman // Int. J. Remote Sensing. — 2005. — **26**. — P. 4197—4218.

61. *Малинников В. А.* Методика оценки эффективности проведенных мероприятий по тушению крупных лесных пожаров посредством анализа фрактальными методами динамики роста пройденных огнем площадей / В. А. Малинников, С. А. Барталев, Е. А. Лупян и др. // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и Аэрофотосъемка. — 2010. — № 6. — С. 58—63.

62. *Bartalev S. A.* Multiyear circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT—VEGETATION / S. A. Bartalev, V. A. Egorov, E. A. Loupian, I. A. Uvarov // Int. J. Remote Sensing. — 2007. — **28(6)**. — P. 1397—1404.

63. *Massonnet D.* Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface / D. Massonnet, K. L. Feigl // Rev. of geophysics. — 1998. — **36(4)**. — P. 441—500.

64. *Burgmann R.* Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation / R. Burgmann, P. A. Rosen, E. J. Fielding // Annu. Rev. Earth and Planet. Sci. — 2000. — **28(1)**. — P. 169—209.

65. *Stramondo S.* Satellite radar and optical remote sensing for earthquake damage detection: results from different case studies / S. Stramondo, C. Bignami, M. Chini [et al.] // Int. J. Remote Sensing. — 2006. — **27**. — P. 4433—4447.

66. *Wright R.* MODVOLC: nearreal-time thermal monitoring of global volcanism / R. Wright, L. P. Flynn, H. Garbeil [et al.] // J. Volcanology and Geothermal Research. — 2004. — **135**. — P. 29—49.

67. *Huggel C.* Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: a case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico / C. Huggel, D. Schneider, P. J. Miranda [et al.] // Ibid. — 2008. — **170**. — P. 99—110.

68. *Hooper A.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers / A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, B. Kampes // Geophys. Res. Lett. — 2004. — **31(23)**. — P. L23611.

69. *Boryan C.* Monitoring US agriculture: The US department of agriculture, national agricultural statistics service, cropland data layer program / C. Boryan, Z. Yang, R. Mueller, M. Craig // Geocarto Int. — 2011. — **26(5)**. — P. 341—358.

70. *McRoberts R. E.* Remote sensing support for national forest inventories / R. E. McRoberts, E. O. Tomppo // Remote Sens. of Environ. — 2007. — **110**. — P. 412—419.

71. *Carfagna E.* The use of remote sensing in agricultural statistics / E. Carfagna, F. J. Gallego // Int. Stat. Rev. — 2005. — **73(3)**. — P. 389—404.

72. *Kussul N.* Crop area estimation in Ukraine using satellite data within the MARS project / N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov [et al.] // IEEE Int. Geoscience and Remote Sens. Symp. (IGARSS), 22—27 July, 2012 / The Institute of Electrical and Electronics Engineers. — Munich, 2012. — P. 3756—3759.

73. *Галлего Х.* Анализ эффективности различных подходов для классификации посевов на основе спутниковой и наземной информации / Х. Галлего, А.Н. Кравченко, Н.Н. Кусуль и др. // Пробл. управления и информатики. — 2012. — № 3. — С. 123—134.

74. *Gallego F. J.* Remote sensing and land cover area estimation / F. J. Gallego // Int. J. Remote Sens. — 2004. — **25(15)**. — P. 3019—3047.

75. *Gallego F. J.* Accuracy, Objectivity and Efficiency of Remote Sensing for Agricultural Statistics / F. J. Gallego, E. Carfagna, B. Baruth // R. Benedetti, M. Bee, G. Espa, F. Piersimoni. Agricultural Survey Methods. — Chichester : John Wiley & Sons, 2010. — P. 193—211.

76. *Jonkman S. N.* An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage / S. N. Jonkman, P. H. A. J. M. van Gelder, J. K. Vrijling // J. Hazard. Mater. — 2003. — **A99**. — P. 1—30.

77. *Bottelberghs P. H.* Risk analysis and safety policy developments in The Netherlands / P. H. Bottelberghs // Ibid. — 2000. — **71**. — P. 59—84.

78. TAW, Technical Advisory Committee on Water Defences, Some considerations of an acceptable level of risk in The Netherlands, TAW, 1985.

79. Institute of Chemical Engineering, Nomenclature for hazard and risk assessment in the process industries, 1985.

80. *Stallen P. J. M.* Three conceptions of quantified societal risk / P. J. M. Stallen, R. Geerts, H. K. Vrijling // Risk Analysis. — 1996. — **16(5)**. — P. 635—644.

81. *Vrijling J. K.* Societal risk and the concept of risk aversion / J. K. Vrijling, P. H. A. J. M. van Gelder // C. G. Soares. Adv. Safety and Reliability. — **1**. — New York : Elsevier Science, 1997. — P. 45—52.

82. *Bowles D. S.* Alamo dam demonstration risk assessment [Електронний ресурс] / D.S. Bowles, L.R. Anderson, J. B. Evelyn [et al.] // ASDSO meeting. URL: http://www.engineering.usu.edu/uwrl/www/faculty/DSB/alamo.html, 1999.

83. USBR, US Department of interior Bureau of Reclamation, Guidelines for achieving public protection in dam safety decision making, 1997.

84. *van Danzig D.* Economic decision problems for flood prevention / D. van Danzig // Econometrica. — 1956. — **24**. — P. 276—287.

85. *Parker D. J.* Urban Flood Protection Benefits / D. J. Parker, C. H. Green, P. M. Thompson. — Brookfield, USA : Gower Technical Press, 1987. — 284 p.

86. *Hydropower&Dams*, Risk Based Dam Safety Evaluations, Conference Report: Part 2, Hydropower&Dams, 1998.

87. *Carter D. A.* The Scaled Risk Integral—A Simple Numerical Representation of Case Societal Risk for Land Use Planning in the Vicinity of Major Accident Hazards, Loss Prevention in the Process Industries / D. A. Carter. — Amsterdam : Elsevier, 1995. — **2**. — P. 219—224.

88. *Serpico S.B.* Information Extraction From Remote Sensing Images for Flood Monitoring and Damage Evaluation / S. B. Serpico, S. Dellepiane, G. Boni [et al.] // Proc. IEEE. — 2012. — **100(10)**. — P. 2946—2970.

89. *Taubenbock H.* Flood risks in urbanized areas — multi-sensoral approaches using remotely sensed data for risk assessment / H. Taubenbock, M. Wurm, M. Netzband [et al.] // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. — 2011. — **11**. — P. 431—444.

90. *Tapia-Silva F.-O.* Estimation of flood losses to agricultural crops using remote sensing / F.-O. Tapia-Silva, S. Itzerott, S. Foerster [et al.] // Phys. Chem. Earth Parts A/B/C. — 2011. — **36(7-8)**. — P. 253—265.

91. *Dewan A. M.* Flood Hazard Delineation in Greater Dhaka, Bangladesh Using an Integrated GIS and Remote Sensing Approach / A. M. Dewan, T. Kumamoto, M. Nishigaki // Geocarto Int. — 2006. — **21(2)**. — P. 33—38.

92. *Dutta D.* A mathematical model for flood loss estimation / D. Dutta, S. Herath, K. Musiake // J. Hydrology. — 2003. — **277**. — P. 24—49.

93. *See L.* Multi-model data fusion for hydrological forecasting / L. See, R. J. Abrahart // Comput. Geosci. — 2001. — **27**, N 8. — P. 987—994.

94. *Schumann G.* The direct use of radar satellites for event-specific flood risk mapping / G. Schumann, G. Di Baldassarre // Remote Sens. Lett. — 2010. — **1(2)**. — P. 75—84.

95. *Persendt F. C.* Drought risk assessment using remote sensing and GIS to alleviate poverty. A case study of the Oshikoto region in Namibia / F. C. Persendt // Conf. Appl. Geoinform. Soc. and Environment (AGSE). — 2009. — Stuttgart University of Applied Sciences, Germany.

96. *Begueria S.* Mapping the hazard of extreme rainfall by peaks over threshold extreme value analysis and spatial regression techniques / S. Begueria, S. M. Vicente-Serrano // J. Appl. Meteorology and Climatology. — 2006. — **45(1)**. — P. 108—124.

97. *Tonini F.* Mapping return levels of absolute NDVI variations for the assessment of drought risk in Ethiopia / F. Tonini, G. J. Lasinio, H. H. Hochmair // Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation. — 2012. — **18**. — P. 564—572.

98. *Куссуль Н. Н.* Оценка рисков стихийных бедствий на основе разнородной геопространственной информации / Н. Н. Куссуль, Б. В. Соколов, Я. И. Зелык и др. // Пробл. управления и информатики. — 2010. — № 6. — С. 97—110.

99. *Скакун С. В.* Оценка риска наводнений на основе разнородных геопространственных данных / С. В. Скакун // Наук. пр. ДонНТУ. Сер. Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. — 2010. — **12(165)**. — С. 94—98.

100. *Horritt M. S.* Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation / M. S. Horritt, P. D. Bates // J. Hydrology. — 2002. — **268**. — P. 87—99.

101. *Horritt M. S.* A methodology for the validation of uncertain flood inundation models / M. S. Horritt // Ibid. — 2006. — **326**. — P. 153—165.

102. *Di Baldassarre G.* A technique for the calibration of hydraulic models using uncertain satellite observations of flood extent / G. Di Baldassarre, G. J.-P. Schumann, P. D. Bates // Ibid. — 2009. — **367**. — P. 276—282.

103. *Di Baldassarre G.* Near real time satellite imagery to support and verify timely flood modelling / G. Di Baldassarre, G. J.-P. Schumann, P. D. Bates // Hydrol Processes. — 2009. — **23**. — P. 799—803.

104. *Khan S. I.* Satellite Remote Sensing and Hydrologic Modeling for Flood Inundation Mapping in Lake Victoria Basin: Implications for Hydrologic Prediction in Ungauged Basins / S. I. Khan, H. Yang, J. Wang [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2011. — **49(1)**. — P. 85—95.

105. *Frazier P. S.* Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data / P. S. Frazier, K. J. Page // Photogramm Eng Remote Sens. — 2000. — **66(12)**. — P. 1461—1467.

106. *Li W.* A Comparison of Land Surface Water Mapping Using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ and ALI / W. Li, D. Zhiqiang, L. Feng [et al.] // Remote Sens. — 2013. — **5**. — P. 5530—5549.

107. *Curlander J. C.* Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing / J. C. Curlander, R. N. McDonough. — Chichester : Wiley-Interscience, 1991. — 672 p.

108. *Elachi C.* Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques / C. Elachi. — New York : IEEE Press, 1988. — 255 p.

109. *Rees W. G.* Physical Principles of Remote Sensing / W. G. Rees. — Cambridge : Cambridge University Press, 2001. — 360 p.

110. *Horritt M. S.* A statistical active contour model for SAR image segmentation / M. S. Horritt // Image Vision Comput. — 1999. — **17**. — P. 213—224.

111. *Shah-Hosseini H.* A TASOM-based algorithm for active contour modelling / H. Shah-Hosseini, R. Safabakhsh // Pattern Recognition Lett. — 2004. — **24**. — P. 1361—1373.

112. *Niedermeier A.* Detection of coastline in SAR images using wavelet methods / A. Niedermeier, E. Romaneessen, S. Lenher // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2000. — **38(5)**. — P. 2270—2281.

113. *Dellepiane S.* Coastline extraction from SAR images and a method for the evaluation of the coastline precision / S. Dellepiane, R. De Laurentiis, F. Giordano // Pattern Recognition Lett. — 2004. — **25**. — P. 1461—1470.

114. *Martinez J. M.* Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data / J. M. Martinez, T. Le Toan // Remote Sens. Environ. — 2007. — **108**. — P. 209—223.

115. *Pulvirenti L.* Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation / L. Pulvirenti, M. Chini, N. Pierdicca [et al.] // Ibid. — 2011. — **115(4)**. — P. 990—1002.

116. *Qi H.* Simulation-based decision support system for flood damage assessment under uncertainty using remote sensing and census block information / H. Qi, M. S. Altinakar // Nat. Hazards. — 2011. — **59(2)**. — P. 1125—1143.

117. *van der Sande C. J.* A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment / C. J. van der Sande, S. M. de Jong, A. P. J. de Roo // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. — 2003. — **4(3)**. — P. 217—229.

118. *Matgen P.* Towards the sequential assimilation of SAR-derived water stages into hydraulic models using the Particle Filter: proof of concept / P. Matgen, M. Montanari, R. Hostache [et al.] // Hydrol. Earth Syst. Sci. — 2010. — **14**. — P. 1773—1785.

119. *Abrahart R. J.* Multi-model data fusion for river flow forecasting: an evaluation of six alternative methods based on two contrasting catchments / R. J. Abrahart, L. See // Ibid. — 2002. — **6(4)**. — P. 655—670.

120. *Xie P.* A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs / P. Xie, A. Arkin // Bul. Amer. Meteorological Society. — 1997. — **78**. — P. 2539—2558.

121. *Frere M.* Early agrometeorological crop yield assessment / M. Frere, G. Popov. Rome, Italy : Food and Agriculture Organization (FAO), 1986. — N 73. — 144 p.

122. *Tucker C. J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // Remote Sens. of Environ. — 1979. — **8**. — P. 127—150.

123. *Huete A.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices / A. Huete, K. Didan, T. Miura [et al.] // Ibid. — 2002. — **83(1)**. — P. 195—213.

124. *Becker-Reshef I.* A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data / I. Becker-Reshef, E. Vermote, M. Lindeman, C. Justice // Ibid. — 2010. — **114**, N 6. — P. 1312—1323.

125. *Boogaard H. L.* User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST control center 1.5 / H. L. Boogaard, C. A. Diepen, R. P. Rotter, J. M. C. A. Cabrera, H. H. van Laar. — Wageningen, Netherlands : Winand Staring Centre, 1998. — 144 p.

126. *Van Keulen H.* Modelling of Agricultural production: weather soils and crops / H. Van Keulen, J. Wolf. — Wageningen, Netherlands : Pudoc, 1986. — 479 p.

127. *Williams J. R.* A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity / J. R. Williams, C. A. Jones, P. T. Dyke // Trans. ASAE. — 1984. — **27**. — P. 129—144.

128. *Ritchie J. T.* Description and performance of CERES-Wheat: A useroriented wheat yield model / J. T. Ritchie, S. Otter. — ARS wheat yield project. — Springfield, Virginia : USDA ARS, 1985. — P. 159—175.

129. *Clevers J. G. P. W.* Combined use of optical and microwave remote sensing data for crop growth monitoring / J. G. P. W. Clevers, H. J. C. van Leeuwen // Remote Sens. Environ. — 1996. — **56**, N 1. — P. 42—51.

130. *Clevers J. G. P. W.* A framework for monitoring crop growth by combining directional and spectral remote sensing information / J. G. P. W. Clevers, C. Buker, H. J. C. van Leeuwen, B. A. M. Bouman // Ibid. — 1994. — **50**, N 2. — P. 161—170.

131. *Curnela Y.* Potential performances of remotely sensed LAI assimilation in WOFOST model based on an OSS Experiment / Y. Curnela, A. J. W. de Wit, G. Duveiller, P. Defourny // Agricultural and Forest Meteorology. — 2011. — **151**, N 12. — P. 1843—1855.

132. *de Wit A. J. W.* Crop growth modelling and crop yield forecasting using satellite-derived meteorological inputs / A. J. W. de Wit, C. A. van Diepen // Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform. — 2008. — **10**. — P. 414—425.

133. *Fang H.* Integration of MODIS LAI and vegetation index products with the CSM-CERES-Maize model for corn yield estimation / H. Fang, S. Liang, G. Hoogenboom // Int. J. Remote Sens. — 2011. — **32**, N 4. — P. 1039—1065.

134. *Heinzel V.* Remote sensing data assimilation for regional crop growth modelling in the region of Bonn (Germany) / V. Heinzel, B. Waske, M. Braun, G. Menz // Proc. IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2007). — Barcelona, 2007. — P. 3647—3650.

135. *Maas S. J.* Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth models / S. J. Maas // Ecological Modelling. — 1988. — **41**, N 3-4. — P. 247—268.

136. *Kogan F.* Forecasting crop production using satellite-based vegetation health indices in Kansas, USA / F. Kogan, L. Salazar, L. Roytman // Int. J. Remote Sens. — 2012. — **33**, N 9. — P. 2798—2814.

137. *Mkhabela M. S.* Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data / M. S. Mkhabela, P. Bullock, S. Raj [et al.] // Agr. and Forest Meteorology. — 2011. — **151**, N 3. — P. 385—393.

138. *Ren J.* Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China / J. Ren, Z. Chen, Q. Zhou, H. Tang // Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform. — 2008. — **10**, N 4. — P. 403—413.

139. *Salazar L.* Use of remote sensing data for estimation of winter wheat yield in the United States / L. Salazar, F. Kogan, L. Roytman // Int. J. Remote Sens. — 2007. — **28**. — P. 3795—3811.

140. *Salazar L.* Using vegetation health indices and partial least square method for estimation of corn yield / Salazar L., Kogan F., Roytman L. // Ibid. — 2008. — **29**, N 1-2. — P. 175—189.

141. *Kogan F.* Winter wheat yield forecasting in Ukraine based on Earth observation, meteorological data and biophysical models / F. Kogan, N. Kussul, T. Adamenko [et al.] // Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation. — 2013. — **23**. — P. 192—203.

142. *Silleos N.* Assessment of crop damage using space remote sensing and GIS / N. Silleos, K. Perakis, G. Petsanis // Int. J. Remote Sens. — 2002. — **23(3)**. — P. 417—427.

143. *Katz R. W.* Statistics of extremes in hydrology / R. W. Katz, M. B. Parlange, P. Naveau // Adv. in Water Res. — 2002. — **25**. — P. 1287—1304.

144. *Cressie N.* The origins of kriging / N. Cresie // Mathematical Geology. — 1990. — **22(3)**. — P. 239—252.

145. *Flage R.* Expressing and communicating uncertainty in relation to quantitative risk analysis / R. Flage, T. Aven // R&RATA. — 2009. — **2(13)**, part 1. — P. 9—18.

146. *Robert C.* The Bayesian Choice / C. Robert. — 2nd ed. — New York: Springer, 2007. — 602 p.

147. *Piers M.* The Development and Application of a Method for the Assessment of Third Party Risk Due to Aircraft Accidents in the Vicinity of Airports / M. Piers // Proc. 19th Int. con. Aeronautical Sci. Congr. — Anaheim, Calif., 1994. — **19**. — P. 507—518.

148. *Dietterich T. G.* Ensemble Methods in Machine Learning / T. G. Dietterich // Lecture Notes in Computer Science. — 2000. — 1857. — P. 1—15.

149. *Zhou Z. H.* Ensembling neural networks: many could be better than all / Z. H. Zhou, J. Wu, W. Tang // Artificial intelligence. — 2002. — **137(1)**. — P. 239—263.

150. *Kotsiantis S.* Combining Bagging and Boosting / S. Kotsiantis, P. Pintelas // Int. J. Comput. Intelligence. — 2004. — **1**, N 4. — P. 324—333.

151. *Polikar R.* Ensemble Learning / R. Polikar // C. Zhang, Y. Ma. Ensemble Machine Learning. — New York : Springer, 2012. — P. 1—34.

152. *Freund Y.* A decision theoretic generalization of online learning and an application to boosting / Y. Freund, R. Schapire // J. Comput. System Sci. — 1997. — **55(1)**. — P. 119—139.

153. *Skakun S. V.* Analysis of applicability of neural networks for classification of satellite data / S. V. Skakun, E. V. Nasuro, A. N. Lavrenyuk, O. M. Kussul // J. Automation and Information Sci. — 2007. — **39(3)**. — P. 37—50.

154. *Kussul N.* Crop classification in Ukraine using satellite optical and SAR images / N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, O. Kravchenko, O. Kussul // Int. J. Information Models and Analyses. — 2013. — **2**, N 2. — P. 118—122.

155. *Jonkman S. N.* Flood Risk Assessment in the Netherlands: A Case Study for Dike Ring South Holland / S. N. Jonkman, M. Kok, J. K. Vrijling // Risk Analysis. — 2008. — **28**, N 5. — P. 1357—1373.

156. *Скакун С. В.* Оцінювання ризику посух за супутниковими даними / С. В. Скакун // Наук. пр. ДонНТУ. Сер. Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. — 2013. — **17**, № 1. — С. 106—112.

157. *Cochran W. Sampling Techniques* / W. Cochran. — New York : John Wiley & Sons, 1977. — 428 p.

158. *Kohonen T.* Self-Organizing Maps / T. Kohonen. — Heidelberg : Springer, 2001. — 501 p.

159. *Kussul N.* Flood Monitoring on the Basis of SAR Data / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun // F. Kogan, A. Powell, O. Fedorov. Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability. — Netherlands: Springer, 2011. — P. 19—29.

160. *Kussul N.* Grid System for Flood Extent Extraction from Satellite Images / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun // Earth Sci. Inform. — 2008. — **1**, N 3. — P. 105—117.

161. *Kussul N.* Intelligent Computations for Flood Monitoring / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun // K. Markov, K. Ivanova, I. Mitov. Int. Book Series «Advanced Research in Artificial Intelligence». — 2008. — **2**. — P. 48—54.

162. *Kussul N.* Data Assimilation Technique For Flood Monitoring and Prediction / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, O. Kravchenko // Intern. J. Inform. Theory Appl. — 2008. — **15(1)**. — P. 76—84.

163. *Куссуль Н.Н.* Нейросетевой метод мониторинга затопленных территорий с использованием радиолокационных спутниковых данных / Н.Н. Куссуль, Е.А. Лупян, А.Ю. Шелестов и др. // Исследование Земли из космоса. — 2008. — **4**. — С. 29—35.

164. *Stevens D.* Increasing the Use of Geospatial Technologies for Emergency Response and Disaster Rehabilitation in Developing Countries / D. Stevens // S. Nayak, S. Zlatanova Remote Sensing and GIS Technologies for Monitoring and Prediction of Disasters. — Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. — P. 57—71.

165. *Frost V. S.* A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise / V. S. Frost, J. A. Stiles, K. S. Shanmugan, J. C. Holtzman // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 1982. — **2**. — P. 157—166.

166. *Lee J. S.* Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review / J. S. Lee, L. Jurkevich, P. Dewaele [et al.] // Rem. Sens. Rev. — 1994. — **8(4)**. — P. 313—340.

167. *Touzi R.* A review of speckle filtering in the context of estimation theory / R. Touzi // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2002. — **40(11)**. — P. 2392—2404.

168. *Gonzalez R. C.* Digital Image Processing / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. — Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall, 2002. — 793 p.

169. EnviSat ASAR Product Handbook [Електронний ресурс]. — ESA, 2007. — Режим доступу: https://earth.esa.int/handbooks/asar.

170. *Sheng Y.* Automated georeferencing and orthorectification of Amazon Basin-wide SAR Mosaics using SRTM DEM Data / Y. Sheng, D. E. Alsdorf // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2005. — **43(8)**. — P. 1929—1940.

171. *Huang G. M.* Algorithms And Experiment On Sar Image Orthorectification Based On Polynomial Rectification And Height Displacement Correction / G. M. Huang, J. K. Guo, J. G. Lv [et al.] // Proc. 20th ISPRS Congress. — Istanbul, 2004. — **35**. — P. 139—143.

172. *Pierce L.* Practical SAR Orthorectification / L. Pierce, J. Kellndorfer, F. Ulaby // IEEE Geosci. Remote Sens. symp. (IGARSS96). — 1996. — **4**. — P. 2329—2331.

173. *Kropatsch W. G.* The Generation of SAR Layover and Shadow Maps From Digital Elevation Models / W. G. Kropatsch, D. Strobl // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 1990. — **28(1)**. — P. 98—107.

174. *Richards W.* Neural voting machines / W. Richards, S. H. Sebastian, G. Pickard // Neural Networks. — 2006. — **19(8)**. — P. 1161—1167.

175. *Zeil P.* Validation of geo-information products for crisis management / P. Zeil // Second Int. Workshop. — 2010. — JRC Ispra, Italy.

176. OGC KML. — http://www.opengeospatial.org/standards/kml.

177. *Solbe S.* Towards operational flood mapping with satellite SAR / S. Solbe, I. Solheim // Proc. 2004 Envisat & ERS Symposium. — Salzburg. — 2004.

178. *Skakun S.* Flood Hazard and Flood Risk Assessment Using a Time Series of Satellite Images: A Case Study in Namibia / S. Skakun, N. Kussul, A. Shelestov, O. Kussul // Risk Analysis. — 2013. — doi: 10.1111/risa.12156.

179. Post Disaster Needs Assessment 2009. A Report Prepared by the Government of the Republic of Namibia, with support from the International Community; 2009. 136 p. — URL: http://siteresources.worldbank.org/INTAFRICA/Resources/ WorldBankNamibiaReportFAlr.pdf.

180. *Van Langenhove G.* Hydro-meteorological extremes — floods and droughts in Namibia [Internet]. Climate Change Capacity Building Workshop; 2012 Oct 09-11; Windhoek, Namibia; [2013 Jul 30]. — URL: http://www.sarva.org.za/sadc/download/namibia2012_11.pdf.

181. *Chander G.* Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors / G. Chander, B. Markham, D. Helder // Remote Sens Env. — 2009. — **113**. — P. 893—903.

182. *Aldroubi A.* Nonuniform sampling and reconstruction in shift-invariant spaces / A. Aldroubi, K. Gruchenig // SIAM Rev. — 2001. — **43(4)**. — P. 585—620.

183. *Huete A.* MODIS Vegetation Index (MOD13) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) / A. Huete, C. Justice, W. van Leeuwen. — 1999. — Version 3. — URL: http:// modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd mod13.pdf.

184. *Brockwell P. J.* Introduction to Time Series and Forecasting / P.J. Brockwell, R. A. Davis. — 2nd ed. — New York : Springer, 2000. — 238 p.

185. *Street J. O.* A Note on Computing Robust Regression Estimates via Iteratively. Reweighted Least Squares / J. O. Street, R. J. Carroll, D. Ruppert // The Americ. Statistician. — 1988. — **42**. — P. 152—154.

186. *Jansen M. J. W.* Validation of CGMS / M. J. W. Jansen // J. F. Dallemand, P. Vossen. Workshop for Central and Eastern Europe on agrometeorological models: theory and applications in the MARS project. — Ispra, Italy, (Eds.). Luxembourg : Office for Off. Publ. of the EU, 1994. — P. 159—170.

187. *Дрейпер Р.* Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Кн. 1 / Р. Дрейпер, Г. Смит / Пер. с англ.— 2-е изд.— М: Финансы и статистика, 1986.— 366 с.; Кн. 2/ Пер. с англ.— 2-е изд.— М: Финансы и статистика, 1987. — 351 с.

188. *Kogan F.* Winter Wheat Yield Forecasting: a Comparative Analysis of Results of Regression and Biophysical Models / F. Kogan, N. Kussul, T. Adamenko [et al.] // J. Autom. Inform. Sci. — 2013. — **45(6)**. — P. 68—81.

189. *Gallego F. J.* Efficiency assessment of using satellite data for crop area estimation in Ukraine / J. Gallego, N. Kussul, S. Skakun [et al.] // Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation. — 2014. — **29**. — P. 22—30.

190. *Kussul N.* Application of satellite optical and SAR images for crop mapping and area estimation in Ukraine / N. Kussul, S. Skakun, O. Kravchenko [et al.] // Int. J. «Information Technologies & Knowledge». — 2013. — **7(3)**. — P. 203—210.

191. *Kussul N.* Crop clasification in Ukraine using satellite optical and SAR images / N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov [et al.] // Ibid. — 2013. — **2(2)**. — P. 118—128.

192. *Gallego F. J.* Double sampling for area estimation and map accuracy assessment F. J. / F. J. Gallego // H. T. Mowrer, R. G. Congalton. Quantifying Spatial Uncertainty in Natural Resources: Theory and Applications for GIS and Remote Sensing. — Chelsea, Michigan, USA : Ann Arbor Press, 1999. — P. 65—77.

193. *Carfagna E.* Using remote sensing for agricultural statistics / E. Carfagna, F. J. Gallego // Int. Stat. Rev. — 2005. — **73(3)**. — P. 389—404.

194. *Gallego F. J.* Crop area estimates through remote sensing: stability of the regression correction / F. J. Gallego, J. Delince, C. Rueda // Int. J. Remote Sens. — 1993. — **14**, N 18. — P. 3433—3445.

195. *Hansen M. H.* Sample survey, Methods and Theory / M. H. Hansen, W. N. Hurwitz, W. G. Madow. — New York, USA : John Wiley & Sons, 1953.

196. *Thompson S. K.* Sampling / S. K. Thompson. — New York, USA : John Wiley and Sons, 1992.

197. *Rumelhart D. E.* Learning representations by back-propagating errors / D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams // Neurocomputing: foundations of research. — Cambridge, MA, USA : MIT Press, 1988. — P. 696—699.

198. *Quinlan J. R.* C4. 5: programs for machine learning / J. R. Quinlan. — Vol. 1. — San Mateo, CA, USA : Morgan Kaufmann, 1993. — 302 p.

199. *McNairn H.* TerraSAR-X and RADARSAT-2 for crop classification and acreage estimation / H. McNairn, J. Shang, C. Champagne, X. Jiao // In: Proc. 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2009). — 12—17 July 2009. — **2**. — P. II-898–II-901.

200. *Vintrou E.* Crop area mapping in West Africa using landscape stratification of MODIS time series and comparison with existing global land products / E. Vintrou, A. Desbrosse, A. Begue [et al.] // Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform. — 2012. — **14**, N 1. — P. 83—93.

201. *Boryan C.* Monitoring US agriculture: the US Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service, Cropland Data Layer Program / C. Boryan, Z. Yang, R. Mueller, M. Craig // Geocarto Inte. — 2011. — **26(5)**. — P. 341—358.

202. *Cortes C.* Support vector machine / C. Cortes, V. Vapnik // Machine learning. — 1995. — **20(3)**. — P. 273—297.

203. *Scheuren J.-M.* Annual Disaster Statistical Review — The Number and Trends 2007 / J.-M. Scheuren, O. le Polain de Waroux, R. Below, D. Guha-Sapir, S. Ponserre // Center for Research of the Epidemiology of Disasters (CRED), Jacoffsaet Printers, Melin, Belgium. — 2008.

204. *Morse A.* Cost Comparison for Monitoring Irrigation Water Use: Landsat Thermal Data Versus Power consumption Data / A. Morse. W. J. Kramber, R. G. Allen // Proc. 17th William T. Pecora Memorial Remote Sensing Symposium. — Denver, CO, 2008.

205. *Скакун С. В.* Web-система регіонального центру підтримки програми UN-SPIDER в Україні / С. В. Скакун // Наука та інновації. — 2011. — **7**, № 3. — С. 17—24.

206. *Шелестов А. Ю.* Информационная система агромониторинга на основе геопространственных данных / А. Ю. Шелестов, А. Н. Кравченко, С. В. Скакун, Н. Н. Куссуль / Кибернетика и системный анализ. — 2013. — № 1. — С. 145—153.

207. *Шелестов А. Ю.* Web-портал системи агромоніторингу / А.Ю. Шелестов, О.М. Кравченко, С.В. Волошин [та ін.] // Наука та інновації. — 2011. — **7**, № 3. — С. 30—35.

208. *Шелестов А. Ю.* Геоінформаційна система фермера / А.Ю. Шелестов, Н. М. Куссуль, Є. В. Загородній [та ін.] // Наука та інновації. — 2011. — **7**, № 3. — С. 25—29.

209. *Moe K.* Sensor Web Technologies for NASA Earth Science / K. Moe, S. Smith, G. Prescott [et al.] // Proc. IEEE Aerospace Conf. — 2008. — P. 1—7.

210. *Moe K.* NASA Technology for the Earth Observation Sensor Web // IEEE Int. Geoscience and Remote Sens. Symp. (IGARSS 2008). — 2008. — **5**. — P. 128—131.

211. *Mandl D.* Sensor Webs: Where They are Today and What are the Future Needs? / D. Mandl, S. W. Frye, M. D. Goldberg [et al.] // Proc. Second IEEE Workshop on Dependability and Security in Sensor Networks and Systems (DSSNS 2006). — 2006. — P. 65—70.

212. Report from the Earth Science Technology Office (ESTO) Advanced Information Systems Technology (AIST) Sensor Web Technology Meeting. — San Diego, USA. — February 13-14, 2007.— URL: http://esto.nasa.gov/sensorwebmeeting/files/AIST_Sensor_Web_Meeting_Report_ 2007.pdf.

213. CEOS Working Group on Information Systems and Services (WGISS). — URL: http:// www.ceos.org/wgiss.

214. GEO (Group on Earth Observations). — www.earthobservations.org.

215. *Kussul N.* Interoperable Infrastructure for Flood Monitoring: Sensor Web, Grid and Cloud / N. Kussul, D. Mandl, K. Moe [et al.] // IEEE J. Selected Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. — 2012. — **5**, N 6. — P. 1740—1745.

216. *Mandl D.* Use of the Eearth Observing One (EO-1) Satellite for the Namibia Sensor Web Flood Early Warning Pilot / D. Mandl, S. Frye, P. Cappelaere [et al.] // IEEE J. Selected Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. — 2013. — **6**, N 2. — P. 298—308.

217. *Згуровский М. З.* Системный анализ: проблемы, методология, приложения / М. З. Згуровский, Н. Д. Панкратова. — Київ: Наук. думка, 2005. — 744 с.

218. *Куссуль Н. Н.* Grid-системы для задач исследования Земли. Архитектура, модели и технологии / Н. Н. Куссаль, А. Ю. Шелестов. — Киев: Наук. думка, 2008. — 452 с.

219. *Шелестов А. Ю.* Структурно-функциональный анализ компонентов Grid-систем / А.Ю. Шелестов // Проблемы управления и информатики. — 2007. — № 5. — С. 119—132.

220. НД ТЗІ 2.5-004—99 «Критерії оцінки захищеності інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу». — ДСТЗІ, Київ, 1999.

221. *Zadeh L.* Fuzzy sets / L. Zaden // Inform. Control. — 1965. — **8**. — 338 p.

222. *Kussul N.* The Wide Area Grid Testbed for Flood Monitoring Using Earth Observation Data / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun // IEEE J. Selected Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. — 2012. — **5**, N 6. — P. 1746—1751.

223. *Shelestov A.* Geospatial data visualisation in Grid system on Ukrainian segment of GEOSS/GMES / A. Shelestov, O. Kravchenko, M. Ilin // Proc. of the Vth Int. Conf. «Information Research&Applications». — Varna, 2007. — **2**. — P. 422—428.

224. *Kussul N.* Grid System for Flood Extent Extraction from Satellite Images / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun // Earth Sci. Inform. — 2008. — **1(3-4)**. — P. 105—117.

225. *Hluchy L.* The Data Fusion Grid Infrastructure: Project Objectives and Achievements / L. Hluchy, N. Kussul, A. Shelestov // Comput. Inform. — 2010. — **29**, N 2. — P. 319—334.

226. *Foster I.* Globus Toolkit Version 4: Software for Service-Oriented Systems / I. Foster // IFIP Int. Conf. Network and Parallel Comput. — Springer-Verlag, LNCS 3779, 2005. — P. 2—13.

227. *Humphrey M.* State and Events for Web Services: A Comparison of Five WS-Resource Framework and WS-Notification Implementations / M. Humphrey, G. Wasson, K. Jackson [et al.] // 4th IEEE Intern. Symp. High Performance Distributed Comput. (HPDC-14), 24—27 July 2005. — Research Triangle Park, NC, 2005.

228. *Allcock W.* The Globus Striped GridFTP Framework and Server / W. Allcock, J. Bresnahan, R. Kettimuthu // Proc. Super Comput. 2005 (SC05). — 2005.

229. *Welch V.* Security for Grid Services / V. Welch, F. Siebenlist, I. Foster // 12th Intern. Symp. High Performance Distributed Comput. (HPDC-12), IEEE Press, 2003.

230. *Foster I.* Modeling Stateful Resources with Web Services / I. Foster, J. Frey, S. Graham // http://www-106.ibm.com/developerworks/library/ws-resource/ws-modelingresources.pdf.

231. OpenGIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard. URL:http://www.opengeospatial. org/standards/gml.

232. *Rahman A.* Modelling and prediction of malaria vector distribution in Bangladesh from remote-sensing data / A. Rahman, F. Kogan, L. Roytman [et al.] // Int. J. Remote Sens. — 2011. — **32**, N 5. — P. 1233—1251.

233. *Rahman A.* Application of Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)-based Vegetation Health Indices for Estimation of Malaria Cases / A. Rahman, N. Krakauer, L. Roytman [et al.] // Am. J. Trop. Med. Hyg. — 2010. — **82**, N 6. — P. 1004—1009.

234. *Kussul N.* Grid Technologies for Satellite Data Processing and Management within International Disaster Monitoring Projects / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun // Grid and Cloud Database Management Eds. S. Fiore, G. Aloisio. — Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — P. 279—306.

235. *Mandl D.* Experimenting with Sensor Webs Using Earth Observing 1 / D. Mandl // Proc. IEEE Aerospace Conf. — 2004.

236. *Brakenridge G. R.* MODIS-based flood detection, mapping, and measurement: the potential for operational hydrological applications / G. R. Brakenridre, E. Anderson // Proc. NATO Advanced Research Workshop Transboundary Floods. — Baile Felix-Oradea, Romania, 2005. — 9 p.

237. *Yilmaz K. K.* Evaluation of a satellite-based global flood monitoring system / K.K. Yilmaz, R. F. Adler, Y. Tian // Intern. J. Remote Sens. — 2010. — Vol. 31, N 14. — P. 3763—3782.

238. *De Groeve T.* Near Real Time Flood Alerting for the Global Distaser Alert and Coordination System / T. Groeve De, Z. Kugler, G. R. Brakenridge // Proc. 4th Int. ISCRAM Conf. / Eds. B. Van de Walle, P. Burghardt and C. Nieuwenhuis. — Delft, 12007. — P. 33—40.

239. *De Groeve T.* Global real-time detection of major floods using passive microwave remote sensing / T. Groeve De, P. Riva // Proc. 33rd Int. Symp. Remote Sens. Environ. — Stresa, 2009.

240. *Wang J.* The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model / J. Wang // Hydrol. Sci. J. — 2011. — **56**, N 1. — P. 84—98.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

ЧАСТЬ 1
МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКОВ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ НА ОСНОВЕ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ 5

Глава 1. **Анализ подходов к оцениванию рисков чрезвычайных ситуаций на основе спутниковых данных** 7

1.1. Стихийные бедствия и спутниковые данные 8
1.2. Понятие риска и обзор количественных мер риска 14
1.3. Анализ рисков природных чрезвычайных ситуаций на основе спутниковых данных 20
1.4. Выводы 33

Глава 2. **Оценивание рисков чрезвычайных ситуаций природного характера на основе слияния данных** 34

2.1. Анализ рисков на основе геопространственных данных 34
2.2. Общая постановка задачи оценки рисков на основе разнородной геопространственной информации и метод ее решения 35
2.3. Методы слияния разнородных спутниковых данных 39
2.4. Общая постановка задачи оценки рисков наводнений на основе разнородной геопространственной информации 42
2.5. Общая постановка задачи оценки рисков засух на основе слияния данных 44
2.6. Оценивание эффективности использования спутниковых данных в задаче анализа рисков 46
2.7. Выводы 48

Глава 3. **Картографирование наводнений по радарным данным** 49

3.1. Основы радиолокационных наблюдений земной поверхности 49
3.2. Сегментация изображений с использованием нейронных сетей Кохонена 51
3.3. Описание радиолокационных данных 55
3.4. Картографирование наводнений с помощью радиолокационных данных 57
3.5. Верификация метода картографирования наводнений 64
3.6. Слияние радиолокационных и оптических спутниковых данных в задаче картографирования наводнений 68
3.7. Выводы 70

Глава 4. **Оценивание рисков наводнений на основе геопространственной информации** 71

4.1. Оценивание относительной частоты затоплений на основе временных рядов данных 71
4.2. Оценивание рисков наводнений с использованием относительной частоты затоплений 74

4.3. Результаты экспериментов 74
4.4. Оценка плотности вероятности наводнения 84
4.5. Выводы 85

Глава 5. **Оценивание риска засух на основе геопространственных данных** 86

5.1. Определение вероятности засух по спутниковым данным 86
5.2. Оценивание повреждений и потерь сельскохозяйственных культур из-за засухи 89
5.3. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур 89
5.4. Оценивание площадей сельскохозяйственных культур 95
5.5. Оценивание риска засух по геопространственным данным 109
5.6. Выводы 110

ЧАСТЬ 2
МОНИТОРИНГ И ОЦЕНИВАНИЕ РИСКОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 111

Глава 6. **Информационные технологии картографирования наводнений** 113

6.1. Общая архитектура системы обработки радиолокационных данных 114
6.2. Сервисы прикладного уровня 117
6.3. Сервисы промежуточного уровня на основе Grid 118
6.4. Совместное использование Grid-инфраструктур для мониторинга наводнений. Проект Wide Area Grid 120
6.5. Программная реализация предложенных компонентов 123
6.6. Выводы 135

Глава 7. **Технология оценивания рисков на основе геопространственных данных и Sensor Web** 136

7.1. Структурно-функциональный анализ Sensor Web 136
7.2. Прогнозирование и мониторинг наводнений с помощью системы Sensor Web 144
7.3. Выводы 150

Глава 8. **Web-ориентированные средства поддержки принятия решений по мониторингу чрезвычайных ситуаций** 151

8.1. Базовые архитектурные принципы 151
8.2. Реализация клиентской части 153
8.3. Реализация взаимодействия с сервером на уровне программного интерфейса 156
8.4. Средства администрирования 156
8.5. Геопространственная база данных 158
8.6. Визуализация геопространственных данных на основе международных стандартов 160
8.7. Выводы 162

Глава 9. **Информационная технология анализа рисков наводнений для Намибии** 163

9.1. Используемые данные и интерфейс 163
9.2. Выводы 168

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 169

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 171

Наукове видання

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

КУССУЛЬ Наталія Миколаївна
СКАКУН Сергій Васильович
ШЕЛЕСТОВ Андрій Юрійович

АНАЛІЗ РИЗИКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

Моделі та технології

(Російською мовою)

Київ, Науково-виробниче підприємство
«Видавництво "Наукова думка" НАН України», 2014

Оформлення художника *М.А. Панасюк*
Художній редактор *Р.І. Калиш*
Технічний редактор *Т.С. Березяк*
Коректор *О.Є. Челок*
Оператор *О.О. Пономаренко*
Комп'ютерна верстка *О.І. Фуженко*

Підп. до друку 12.11.2014. Формат 70×100/16. Папір офс. № 1.
Гарн. Таймс. Друк. офс. Ум. друк. арк. 15,11.
Ум. фарбо-відб. 16,25. Обл.-вид. арк. 12,5.
Тираж 300 прим. Зам. № ДФ 275

НВП «Видавництво "Наукова думка" НАН України»
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру ДК № 2440 від 15.03.2006 р.
01601 Київ 1, вул. Терещенківська, 3

ПП «Видавництво "Фенікс"»
03680 Київ 680, вул. Шутова, 13б

АНАЛИЗ РИСКОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ
НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Куссуль Наталия Николаевна
доктор технических наук, заместитель директора, заведующий отделом информационных технологий и систем Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины. Профессор кафедры информационной безопасности НТУУ "КПИ". Член рабочей группы WGISS международного комитета спутниковых наблюдений CEOS. Область научных интересов — методы интеллектуальных вычислений, а также методы обработки спутниковых данных, информационные технологии. Автор более 250 научных публикаций, в том числе восьми монографий и двух учебных пособий.

Скакун Сергей Васильевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией спутникового мониторинга Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины. Лауреат премии НАН Украины для студентов вузов, удостоен гранта и стипендии Президента Украины для молодых ученых. Член рабочей группы WGISS международного комитета спутниковых наблюдений CEOS. Область научных интересов — методы интеллектуальных вычислений, информационные технологии. Автор более 80 научных публикаций, в том числе четырех монографий.

Шелестов Андрей Юрьевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных наук Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. Член рабочей группы WGISS международного комитета спутниковых наблюдений CEOS.
Область научных интересов — методы интеллектуальных вычислений, моделирование и разработка распределенных систем, информационные технологии. Автор более 150 научных публикаций, в том числе шести монографий и двух учебных пособий.

НАУКОВА ДУМКА