

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

**НДИКУМАНА ЭЛИАС**

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ  
СЕКТОРЕ РЕСПУБЛИКИ БУРУНДИ**

Специальность 1.6.20– Геоинформатика, картография

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена на кафедре прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ)

**Научный руководитель:** **Истомин Евгений Петрович**, доктор технических наук, профессор, директор Института информационных систем и геотехнологий ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

**Официальные оппоненты:** **Якушев Денис Игоревич**, доктор технических наук, профессор, профессор Санкт-Петербургского университета МВД РФ

**Кириенко Андрей Васильевич**, кандидат технических наук, начальник отдела «Исследований методов машинной обработки видовой информации и разработки специального программного обеспечения» АО «Конструкторское бюро «Луч»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»

Защита диссертации состоится « 1 » июля 2024 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, дом 98, конференц-зал ЛСО.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.365.01,  
доктор технических наук

Соколов А. Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Анализ текущего состояния адаптации сельскохозяйственной деятельности к климатическим катастрофам в большинстве стран, особенно в менее развитых, таких как Бурунди, показал, что управление рисками, связанными с изменением климата, недостаточно эффективно, несмотря на наличие существующих методов прогнозирования погоды. Отсутствие технических методов прогнозирования гидрометеорологических рисков, связанных с динамическими изменениями погодных параметров, с учетом особенностей развития и условий роста того или иного растения, остается проблемой, учитывая различные климатические условия, в которых выращиваются растения. Кроме того, отсутствие технических методов, таких как географические информационные системы, которые могли бы удовлетворить потребности фермеров и предоставить им в режиме реального времени пространственное распределение показателей риска, связанного с климатическими бедствиями, остается проблемой для организации и эффективного управления сельскохозяйственной деятельностью. Следует также отметить, что колебания определенных климатических параметров могут стать причиной возникновения ущерба, поскольку их колебания могут привести к превышению порогового значения, за которым может возникнуть нарушение нормального режима роста сельскохозяйственных растений.

Разработка и использование модели географической информационной системы для управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе с учетом конкретных условий выращивания того или иного растения устранил недостатки существующих моделей, обеспечив фермеров и лиц, принимающих решения в сельскохозяйственном секторе, информацией, необходимой для принятия решений с учетом рисков, которые могут быть вызваны флуктуациями погодных параметров. Это повысит эффективность сельскохозяйственного сектора, позволив ему адаптироваться к изменению климата и минимизировать потери.

Таким образом, актуальной является научная задача совершенствования моделей и методик геоинформационного управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе в Бурунди

**Цели диссертационной работы** – минимизация влияния природных явлений на урожайности в республике Бурунди на основе прогнозирования гидрометеорологических рисков.

**Объект исследования** – система управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди.

**Предмет исследования** – технологии и модели геоинформационного управления рисками в сельскохозяйственных районах Бурунди.

**Основные задачи исследования:**

1. анализ гидрометеорологической обстановки в Республике Бурунди;
2. разработка требований управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди;
3. статистический анализ параметров, влияющих на возникновение гидрометеорологических рисков в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди;
4. разработка параметрической модели управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди;
5. разработка информационной системы обеспечения принятия решений на основе гидрометеорологических рисков.

**Методы исследования.** Решение поставленных в диссертации задач базируется на современных методах научного исследования:

1. обобщение и анализ существующего опыта моделирования динамики природных явлений;
2. системный анализ и концептуальное моделирование;
3. аналитические исследования;

4. математическое моделирование;
5. прогнозирование;
6. эксперимент.

#### **Научная новизна**

– обоснованы требования к геопространственному представлению сельскохозяйственных регионов Республики Бурунди на основе многопараметрического анализа характеристик геоинформационных систем и сформулированы приоритетные направления экономического развития Бурунди;

– сформулированы методики пространственного представления геоданных для сельскохозяйственных регионов Бурунди;

– впервые разработаны принципы управления стихийными бедствиями для регионов Бурунди, основанные на модели управления рисками с использованием геоинформационной системы;

– впервые разработана модель оценки риска для природной геосистемы с недостаточной (ограниченной) информацией о параметрах ее состояния. Для анализа состояния параметров геосистемы в заданный момент времени используются вероятностные характеристики случайного процесса, описывающего поведение параметров системы, на основе знания текущего состояния этих параметров;

– впервые разработана модель, позволяющая прогнозировать коэффициент ущерба, на основе статистических характеристик параметров текущего момента для сельскохозяйственных регионов Республики Бурунди.

#### **Положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Требования к геоинформационному управлению гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди.

2. Параметрическая модель оценки гидрометеорологических рисков в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди.

3. Методика представления геоданных модели прогнозирования гидрометеорологических рисков в сельскохозяйственном секторе Республики Бурунди.

4. Модель геоинформационной системы управления гидрометеорологическими рисками в Республике Бурунди.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Полученные научные результаты соответствуют пунктам 3, 6, 7, 11, 12, 20, 18, 21 паспорта научной специальности 1.6.20. «Геоинформатика и картография».

**Практическая и научная значимость работы** заключается в том, что значимая научно-техническая задача управления георисками решена путем применения модели геоинформационной системы, разработанной для управления рисками в области сельскохозяйственной деятельности.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что предложенные модель и методика позволяют улучшить сельскохозяйственную деятельность в Бурунди, поскольку дают возможность заранее принимать решения по минимизации потерь, связанных с рисками, вызванными опасными природными явлениями, обусловленными последствиями изменения климата.

**Достоверность полученных результатов.** Разработанные модели были протестированы путем проведения серии численных экспериментов по прогнозированию показателей риска и ущерба с учетом динамических параметров (среднесуточной температуры и суточного количества осадков), оказывающих непосредственное влияние на сельскохозяйственную деятельность в различных регионах Бурунди. Результаты, полученные в ходе численного моделирования, сравнивались с данными натурных наблюдений с применением научных методов верификации эффективности модели.

### **Апробация работы:**

1. XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 16-28 февраля 2022 г.);
2. Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационное развитие информационных систем и технологий в гидрометеорологии» (Санкт-Петербург, 12 апреля 2022 г.);
3. Международная научно-практическая конференция молодых ученых «ИНФОГЕО 2023: Информационные системы в Арктике» (Санкт-Петербург, 7 ноября 2023 г.).

**Личный вклад автора.** Кандидат участвовал в подготовке основных документов, необходимых для проведения исследования, принимал участие в обработке данных и в разработке модели геоинформационной системы, участвовал в анализе полученных результатов и в составлении документов, необходимых для публикации полученных результатов в различных научных журналах.

**Публикации.** Результаты исследования опубликованы в 4 статьях в научно-технических изданиях, из них 3 статьи – в рецензируемых журналах из рекомендованного перечня ВАК Министерства образования и науки РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка используемых сокращений и 6 приложений. Объем работы составляет 167 страниц, 38 рисунков, 7 таблиц, 32 формулы. Список использованной литературы включает 112 источников.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обозначены объект, предмет, задачи и цель исследования, представлена актуальность и научная новизна работы, ее практическая и теоретическая значимость, краткое содержание диссертации по главам, перечислены положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** В первой главе проведен анализ географического и экономического положения Республики Бурунди; проанализированы основные проблемы экономического сектора; сформулированы основные приоритеты развития экономического сектора страны; проанализировано положение сельскохозяйственного сектора, животноводческого сектора и транспортного сектора; определены основные проблемы, стоящие перед экономикой Бурунди; сформулированы рекомендации, необходимые для повышения общеэкономического уровня страны.

Бурунди расположена в Восточной Африке между 28°58' и 30°53' восточной долготы и 2°15' и 4°30' южной широты. Ее экономика в основном основана на сельском хозяйстве. На данный момент в Бурунди не существует технических методов рационального управления сельскохозяйственной деятельностью с учетом влияния изменения климата. Значительная часть сельскохозяйственной деятельности подвержена негативному воздействию изменения климата. Кроме того, на нее негативно влияют динамические изменения температуры и осадков. Длительное повышение температуры может привести к засухе, что угрожает росту некоторых растений. Культуры, выращиваемые в Бурунди, имеют различные климатические условия (температура, осадки и т. д.), и динамические изменения параметров, определяющих климатические условия, могут привести к риску для роста определенных растений, что может вызвать потери за счет снижения урожайности сельскохозяйственной деятельности.

На основе анализа географической и климатической обстановки изменение климата зависит от физических особенностей страны, и риски распределены в зависимости от климатических регионов Бурунди. Поскольку Бурунди – страна со сложным рельефом, она делится на пять эоклиматических регионов, которые подвержены различным бедствиям в зависимости от их структуры.

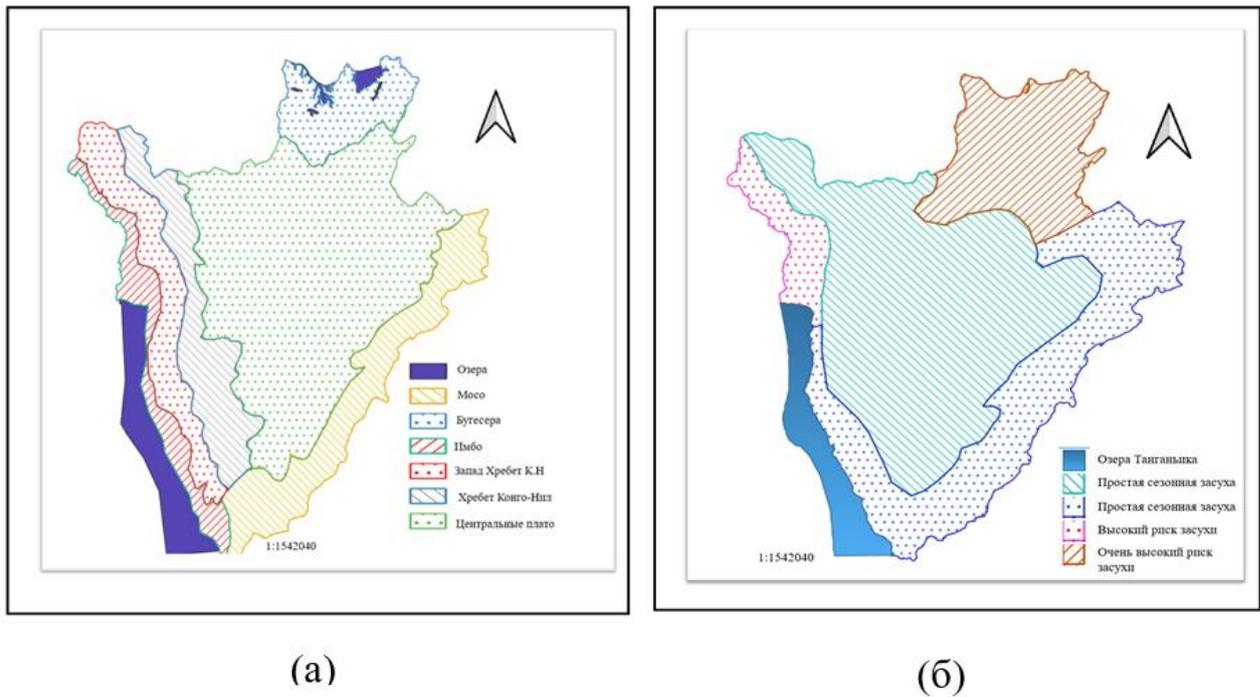


Рис.1. Карта экоклиматических регионов Бурунди (а); Карта уязвимых мест к засухе (б).

Пространственное распределение опасных явлений, связанных с риском, зависит от климатического региона, а их воздействие при этом зависит от рельефа. Эрозия, засуха, наводнения и колебания погодных условий являются основными причинами экономических потерь, причем интенсивность воздействия этих факторов зависит от структуры рельефа. Горные районы по-прежнему подвержены эрозии в большей степени, чем остальная часть страны, что объясняет негативное влияние осадков, особенно в горных районах вокруг хребта Конго – Нил. Следует отметить, что низменные регионы относительно мало подвержены засухе, за исключением впадины Бугезера. В случае сильных дождей низменные регионы, особенно равнина Имбо, остаются в значительной степени подверженными наводнениям.

Несмотря на стремление правительства противодействовать рискам в сельскохозяйственном секторе, в частности путем создания механизма оперативного принятия решений, учитывающего вышеупомянутые факторы риска, существующие методы прогнозирования метеорологических параметров недостаточны для решения актуальных проблем. Кроме того, существующие методы представления пространственных данных не дают возможности прогнозировать показатели риска в зависимости от климатических условий для роста соответствующих растений.

На основе поставленных задач и цели исследования в диссертации были определены основные положения управления гидрометеорологическими рисками в сельскохозяйственном секторе:

- прогнозирование рисков;
- определение границ зоны риска и периметра исследования;
- сбор, описание и картографическая расшифровка исторических и современных явлений;
- классификация и картирование уровней опасности;
- определение эталонной опасности, от которой необходимо защититься или для которой необходимо измерить риск;
- выявление и определение приоритетности социально-экономических и гуманитарных задач (оценка рисков);
- характеристика различных видов уязвимости (факторы, критерии, индикаторы);

- при необходимости измерение возникшего риска с помощью индексов риска или потенциальных потерь (количественная оценка риска).

На основе многопараметрического анализа характеристик ГИС обоснованы требования к геопространственному представлению регионов сельскохозяйственного сектора Бурунди и определены приоритетные направления экономического развития Бурунди. В качестве основных требований и функциональных возможностей к существующей ГИС, исходя из поставленных задач и цели исследования, в диссертации выделены следующие положения:

- *Планирование.* Программы обеспечения безопасности начинаются с понимания проблемы. Это предполагает стратегическое и тактическое планирование для определения местоположения и выявления потенциальных проблем управления рисками. С помощью геоинформационных систем можно определить эти риски и оценить их последствия. В плане должны быть выявлены очевидные опасности, такие как наводнения, эрозия, засуха, а также другие потенциальные риски или цели. Данные о рисках могут быть объединены с другими картографическими данными (плотность населения, улицы, трубопроводы, линии электропередач, рельеф, состояние грунта) для получения рациональной оценки рисков.
- *Меры по устранению последствий.* После проведения оценки риска с помощью ГИС-анализа можно легко определить наличие вблизи установленной опасной зоны строений, инженерных коммуникаций, сельскохозяйственных полей, скотомогильников и пострадавших населенных пунктов. Эти данные могут быть использованы для определения потенциального влияния рисков. Другие меры по снижению рисков могут быть направлены на контроль рисков превышения критического уровня и создание буферных зон безопасности вокруг сооружений, подверженных высокому риску, или на экологический мониторинг. Снижение риска предполагает понимание потенциальных опасностей, которые могут возникнуть в результате этих чрезвычайных ситуаций, и их целенаправленное использование для защиты и/или предотвращения.
- *Готовность.* Готовность включает в себя деятельность по подготовке к реальным чрезвычайным ситуациям. Эти мероприятия предусматривают планирование действий в чрезвычайных ситуациях, создание моделей и обучение. При возникновении чрезвычайной ситуации ГИС может быть использована для ответа на такие вопросы, как: «Где должны быть размещены группы быстрого реагирования для улучшения времени и возможностей реагирования?» или «Какие критически важные активы были потеряны?».
- *Реагирование.* Первоочередной задачей при ликвидации последствий стихийного бедствия является обеспечение безопасности людей и ликвидация угрожающих жизни ситуаций, таких как пожар, взрывы, наводнения, обрыв проводов или обрушение конструкций. Специалисты по управлению рисками должны стабилизировать ситуацию и снизить вероятность вторичного ущерба, а также ускорить проведение других экстренных операций для восстановления работоспособности пострадавших.
- *Восстановление.* Восстановительные работы начинаются после того, как непосредственная угроза жизни, имуществу и критической инфраструктуре устранена. Восстановительные работы часто проходят в два этапа – краткосрочный и долгосрочный. Как следствие, географические информационные системы (ГИС) могут применяться в сельском хозяйстве, на всех уровнях государственного управления для управления рисками, на всех этапах подготовки, планирования, реагирования, восстановления и снижения последствий чрезвычайных ситуаций.

В соответствии с целями и задачами, поставленными в ходе исследования для данной диссертации, определены качества идеальной геоинформационной системы:

- доходность (в зависимости от разрешения организации);
- актуальность (особенно для результатов);

- гибкость (способность к развитию);
- безопасность (обеспечение защиты конфиденциальной информации).
- конкурс (проверка качества и эффективности обработки);
- автономность (в частности, программы, обеспечивающей эволюцию переносимости);
- кооперативность (должны быть четко определены задачи и функции различных подразделений и вовлеченных в процесс лиц);
- мотивация (разработка и использование должны управляться пользователем);
- документация (должна быть написана совместно с разработкой программного обеспечения)

*Научная новизна* заключается в том, что разработаны стратегии управления рисками, требования и свойства геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления рисками в агропромышленном комплексе с использованием геоинформационной системы.

**Вторая глава** посвящена модели оценки рисков. В этой главе представлен общий обзор принципов управления гидрометеорологическими рисками, существующих проблем в области управления рисками и основных принципов, необходимых для эффективного управления гидрометеорологическими рисками, особенно в агропромышленном комплексе. Также рассмотрены основные понятия, связанные с управлением рисками.

Представлена параметрическая модель управления гидрометеорологическими рисками и принципы ее работы. Данная модель работает на основе анализа исторического аспекта параметра. Для прогнозирования риска модель опирается на характеристики параметра, такие как коэффициент автокорреляции, среднее значение, среднеквадратичное отклонение, текущее значение и уровень, при превышении которого параметр способен быть рискогенным.

При прогнозировании риска от какого-либо события необходимо спрогнозировать вероятность наступления такого события  $Q(t_3)$ , где  $t_3$  – глубина прогноза.

Событие (например, засуха, наводнение, эрозия и т.д.) считается наступившим, если уровень значения температуры или осадков  $(X(t))$  превысил определенные границы, т.е. событие не началось, если уровень заданного параметра находится в пределах  $D(t) = [a(t), b(t)]$ , где  $a(t) = 0, b(t)$  – ординатор.

Предположим, что закон изменения во времени температуры воздуха и осадков хорошо описывается гауссовским процессом с параметрами  $m_x(t)$ ,  $\sigma_x(t)$  и  $r_x(t_1, t_2)$ .

Будем считать, что событие имеет двухсторонний предел  $D(t) = [a(t), b(t)]$ , где  $a(t)$  и  $b(t)$  могут иметь любое значение в зависимости от условий, необходимых для развития конкретного растения.

$a(t)$  – нормальное значение параметра (температуры, осадков), начиная с которого растения хорошо растут.

$b(t)$  – уровень параметра (температуры, осадков), при котором урожай начинает повреждаться.

Для оценки рисков используем выражения:

$$P^*(t_3 / x_0) = \Phi\left\{\frac{b - m_x(t_3) - r_x(0, t_3) \cdot [x_0 - m_x(0)]}{\sigma_x(t_3) \sqrt{1 - r_x^2(0, t_3)}}\right\} - \Phi\left\{\frac{-m_x(t_3) - r_x(0, t_3) \cdot [x_0 - m_x(0)]}{\sigma_x(t_3) \sqrt{1 - r_x^2(0, t_3)}}\right\} \quad (1),$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left\{-\frac{z^2}{2}\right\} dz \quad (2).$$

$P^*(t_3 / x_0)$  – это вероятность того, что случайный процесс не выходит из заданных пределов при условии, что известно значение этого процесса в начальный момент времени  $t = 0, (x(t = 0) = x_0)$ .

Пусть  $R^*(t_3 / x_0)$  – это вероятность того, что случайный процесс выходит из заданных пределов при условии, что известно значение этого процесса в начальный момент времени  $t = 0, (x(t = 0) = x_0)$ .

Тогда можно найти значения по формуле:

$$R^*(t_3 / x_0) = 1 - P^*(t_3 / x_0) \quad (3).$$

Считается, что на величину ущерба от заданного параметра (температуры, осадков) оказывают влияние ряд факторов: максимальный уровень заданного параметра (выше ординара), скорость нарастания заданного параметра, длительность события, вызванного заданным параметром. С учетом этого сделаем некоторые предположения.

Ущерб, нанесенный событием, пропорционален площади фигуры, ограниченной кривой  $X(t)$  и уровнем  $C$  (рис. 1.).

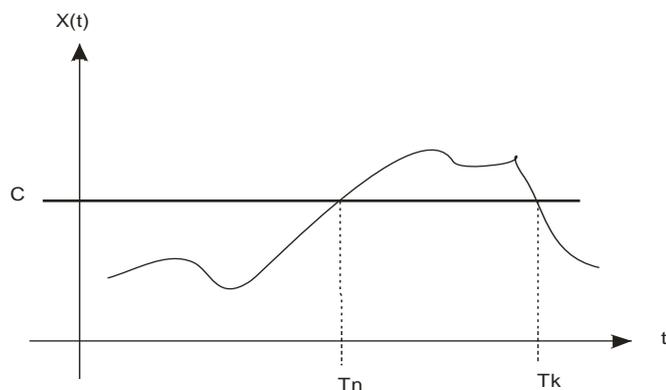


Рис. 2. Начало и окончание события, приводящего к риску.

Обозначим:

$$I = \int_{T_n}^{T_k} (X(t) - c) dt \quad (4),$$

где  $I$  – показатель ущерба;

$T_n$  – начало события;

$T_k$  – окончание события.

$I_{\max}$  – максимальный показатель ущерба.

Тогда:

$$k_u = \frac{I}{I_{\max}} \quad (5),$$

где  $k_u$  – коэффициент ущерба.

Поскольку в выражении (4) все величины являются стохастическими, получить аналитическое выражение для уравнения (5) в задачах прогнозирования практически невозможно. Воспользуемся оценкой для  $I$  и, соответственно,  $k_u$ .

Предположим, что нам известны прогнозируемые оценки  $X_m$  максимально возможного значения температур или количества осадков  $X_{\max}(t)$  и времени нахождения случайного процесса  $X(t)$  выше уровня  $C$ , которое может быть получено из соотношения:

$$\theta = k_k - k_n \quad (6),$$

где  $\theta$  – продолжительность прогнозируемого периода наводнения или засухи является случайной величиной, но может иметь оценку в виде ее математического ожидания  $\bar{T}$ .

Тогда (рис. 2.) в качестве оценки  $\bar{I}$  интеграла (4) для численного интегрирования может быть использована формула треугольника:

$$\bar{I} = \frac{1}{2} \cdot \bar{T} \cdot \bar{X}_m \quad (7),$$

где  $\bar{X}_m = X_m - C$

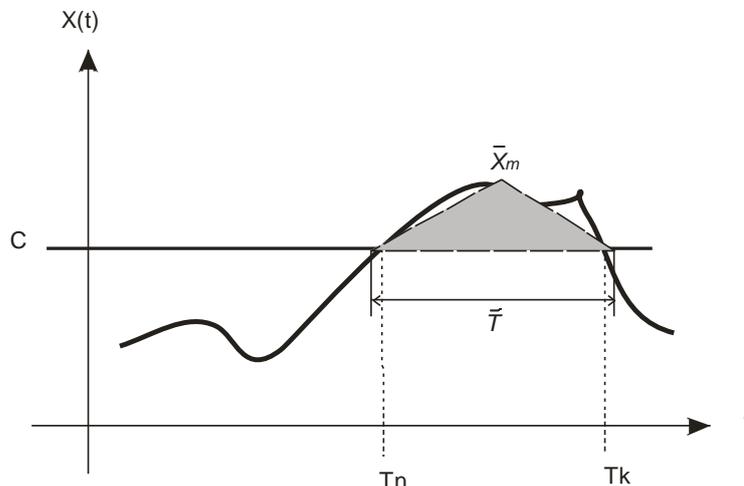


Рис. 2. Оценка интеграла  $\bar{I}$ .

Для оценки  $I_{\max}$  воспользуемся следующими допущениями. Прежде всего, из истории наблюдения температур или количества осадков возможно определить наблюдаемый максимум значений  $X_{\max}$  и наблюдаемую максимальную продолжительность количества осадков или температур  $T_{\max}$ . Тогда в качестве оценки  $I_{\max}$  можно воспользоваться той же формулой треугольников:

$$I_{\max} = \frac{1}{2} \cdot T_{\max} \cdot X_{\max} \quad (8),$$

где  $X_{\max} = X_{\max} - C$ .

Подставим (8) и (7) в (6) получим оценку коэффициента ущерба:

$$k_u = \frac{\bar{T} \cdot \bar{X}_m}{T_{\max} \cdot X_{\max}} \quad (9)$$

Коэффициент ущерба может принимать значения от 0 до 1.

Для оценок времени прогнозируемого события (наводнения или засухи)  $\bar{T}$  и возможного максимума параметра (температуры или количества осадков)  $X_m$  можно использовать различные методы, как физические модели, так и стохастические методы. Выбор метода зависит от поставленных задач исследования и глубины прогноза.

Для оценки риска необходимо определить ущерб, который будет нанесен при наступлении события (например, наводнения или засухи), вызвавшего риск.

Представим, что ожидаемый ущерб от события (наводнения или засухи) можно определить по максимальному ущербу, наблюдававшемуся ранее. Тогда на величину ожидаемого ущерба будет влиять показатель ущерба  $I$ , значение которого можно рассчитать по формуле (4). Однако получить точное значение  $I$ , как и точное значение прогнозируемого ущерба, невозможно, поэтому будут использоваться оценки этих показателей.

Пусть величину ущерба можно оценить как:

$$\bar{W} = k_u \cdot W_{\max} \quad (10),$$

где:  $k_u$  – коэффициент ущерба;

$\bar{W}$  – оценка прогнозируемого ущерба;

$\bar{W}_{\max}$  – максимальный наблюдаемый ущерб.

Тогда, используя оценку для  $k_u$  из (9), получим следующее выражение:

$$\bar{W} = \frac{\bar{T} \cdot \bar{X}_m}{T_{mm} \cdot X_{mm}} \cdot W_{\max} \quad (11).$$

В результате некоторых преобразований получена оценка предполагаемого ущерба, в случае наступления события (наводнения, засухи или другого события), приведшего к нему.

Для оценки риска воспользуемся результатами, полученными в работе [111], где

$$\bar{R}^* = (1 - P_*(t_3/x_0)) \cdot \bar{W} \text{ – верхняя оценка риска} \quad (12),$$

а  $P(t_3/x_0)$  – вероятность невыхода случайного процесса за пределы установленных границ при условии, что нам известно значение этого процесса в начальный момент времени,  $t = 0$  ( $x(t=0) = x_0$ ) [55, 77].

Тогда

$$\bar{R}^* = (1 - P_*(t_3/x_0)) \cdot \frac{\bar{T} \cdot \bar{X}_m}{T_{mm} \cdot X_{mm}} \cdot W_{\max} \quad (13)$$

Предположим, что на этапе предварительных наблюдений было установлен закон изменения во времени заданного параметра, который хорошо описывается гауссовским процессом с параметрами  $m_x(t)$ ,  $\sigma_x(t)$  и  $r_x(t_1, t_2)$ .

Будем полагать, что событие обладает двусторонним пределом  $D(t) = [a(t), b(t)]$ ,  $a(t) = -\infty$ ,  $b(t) = b$  (нижняя граница устанавливается тождественно  $-\infty$ , чтобы исключить влияние нормального уровня, с которого растения хорошо растут.).

Тогда, после преобразований (13), получается:

$$\bar{R}^* = 1 - \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-r^2(0, t_3))}} \int_0^{t_3} |\omega(t/x_0)| dt \right) \cdot \frac{\bar{T} \cdot \bar{X}_m}{T_{mm} \cdot X_{mm}} \cdot W_{\max}, \quad (14),$$

где  $\omega(t/x_0) = P\{X(t) \in D(t), X(t+\tau) \in D(t+\tau) / X(0) = x_0\}$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\{-z^2/2\} dz. \quad (15)$$

Таким образом, в результате получают оценки риска ( $\bar{R}^*$ ) и предлагается методика оценки возможного ущерба от того или иного события (наводнения и засухи). Методика предполагает, что известны данные о среднем максимальном значении параметра и средней продолжительности действия параметра. Для оценки этих параметров можно использовать физические и стохастические модели.

Опираясь на задачи и цели исследования, поставленные в данной диссертации, и используя формулы 1, 2, 3, 4 и 5, разработана параметрическая модель на основе языка программирования VBA. Настоящая модель может быть использована для прогнозирования показателя риска и ущерба. Также модель прогнозирует вероятность того, что заданный параметр не выходит из заданных пределов заданного уровня. Данная параметрическая модель масштабируется, и это ей дает возможность прогнозировать риски на разных уровнях с учетом статистических характеристик рассматриваемого параметра.

В качестве примера ниже показано прогнозирование вероятности того, что температура превысит 25 °С, затем 27 °С, затем 29 °С и 31 °С. В качестве нормального уровня температуры была взята температура 15 °С, так как при этой температуре почти все растения растут нормально. Прогноз рисков для сельскохозяйственной деятельности касался июля месяца, когда в Бурунди обычно не выпадает достаточного количества осадков. Этот

недостаток осадков может быть усугублен повышением температуры в регионе. Для проведения этого исследования модель использует основные температурные характеристики, наблюдаемые в течение месяцев июня и июля, и затем было спрогнозировано возникновение рисков для августа месяца.

После запуска этой модели были получены следующие результаты:

| $B_i$ | $P(Tz/X_0)$ | $R(Tz/X_0)$ | $Dr$        | $Ku$     |
|-------|-------------|-------------|-------------|----------|
| 25    | 0.00588111  | 0.99411889  |             | 0.492601 |
| 27    | 0.512638653 | 0.487361347 | 0.506757543 | 0.291207 |
| 29    | 0.995096631 | 0.004903369 | 0.989215521 | #DIV/0!  |
| 31    | 0.999999858 | 1.42236E-07 | 0.994118748 | #DIV/0!  |

Рис. 3 Пример полученных результатов при применении модели для данных температур, полученных со станции Гитега.

Расшифровка представленных на рисунке 3 результатов заключается в следующем:

$B_i$  – представляет собой уровень температуры, выше которого температура может нанести ущерб сельскохозяйственной деятельности. Для данного исследования были выбраны четыре различных температурных уровня.

$P(Tz/X_0)$  – эквивалентно  $P^*(t_3/x_0)$  и представляет собой вероятность того, что температура не выходит из заданных пределов заданного уровня « $B_i$ ».

$R(Tz/X_0)$  – эквивалентно  $R^*(t_3/x_0)$  и представляет собой вероятность того, что температура выходит из заданных пределов заданного уровня « $B_i$ ».

$Dr$  – представляет собой разницу между наблюдаемым риском на уровне « $B_i$ » по сравнению с наблюдаемым риском на начальном уровне.

$Ku$  – представляет собой коэффициент ущерба в зависимости заданного уровня « $B_i$ ».

Как показано на рисунке 3, чем ниже уровень температуры « $B_i$ », тем выше вероятность того, что он будет сопровождаться большим риском, и, соответственно, коэффициент ущерба  $Ku$  увеличится. Если уровень температуры « $B_i$ » повышается, вероятность того, что он будет иметь большой риск, уменьшается и, соответственно, уменьшается коэффициент ущерба. В данном случае для температурного уровня выше 29 °C риск равен нулю, и поэтому модель показывает, что коэффициент ущерба  $Ku$  не существует, и модель вместо значения показывает (#DIV/0!).

По мере уменьшения температурного уровня « $B_i$ », вероятность того, что температура не превысит этот уровень, уменьшается, а вероятность того, что температура превысит этот уровень, увеличивается. Наоборот, по мере увеличения уровня температуры « $B_i$ » вероятность того, что температура не превысит этот уровень, увеличивается, а вероятность того, что температура превысит этот уровень, уменьшается.

Эта модель была применена к данным о температуре и осадках, полученным с различных метеостанций. Полученные результаты показывают, что модель необходима для управления рисками различных характеристик. Тем не менее, она оказывается сложной для одновременной интерпретации пространственных данных. Сложность заключается в том, что она позволяет рассчитывать риски, вызванные любым событием, отдельно для конкретной точки, что усложняет пространственную интерпретацию зон риска.

Для облегчения пространственной интерпретации или пространственного анализа результатов, полученных с помощью этой модели, необходимо внедрить геоинформационную модель, которая может быть использована для прогнозирования рисков с помощью процессов, используемых в этой параметрической модели.

*Научная новизна* заключается в том, что разработана параметрическая модель управления гидрометеорологическими рисками, позволяющая прогнозировать показатель риска и показатель ущерба с использованием вероятностной математической концепции с

целью временного и пространственного представления динамического объекта ГИС для поддержки принятия решений в агропромышленном комплексе. Впервые применены модель и методология для оценки вероятности наступления опасного события на основе статистических характеристик параметра, способного вызвать возникновение ущерба в сельскохозяйственном секторе.

**В третьей главе** представлена методика управления гидрометеорологическими рисками. Данная методика основана на анализе физико-географического аспекта страны с целью определения влияния физического аспекта Бурунди на возникновение рисков в сельскохозяйственном комплексе; на анализе гидрометеорологических данных с помощью методов статистического анализа, чтобы глубоко понять их основные свойства, учитывая, что они играют ведущую роль в функционировании модели оценки рисков.

На основе модели рельефа, интегрированной в географическую информационную систему, был проведен анализ рельефа Бурунди. Этот анализ позволил выявить наличие очень гористого рельефа на всей территории страны. Согласно полученным результатам, Бурунди можно разделить на пять частей в зависимости от высоты над уровнем моря: Западная часть страны с очень низкой высотой около 770 – 1100 м, восточная часть с высотой около 1100 – 1400 м, северная часть с высотой 1400 – 1600 м, центральная часть с высотой 1500 – 2000 м и горный хребет, расположенный между центральной частью и западной частью, начиная с севера и заканчивая на юге страны с высотой около 2000 – 2600 м.

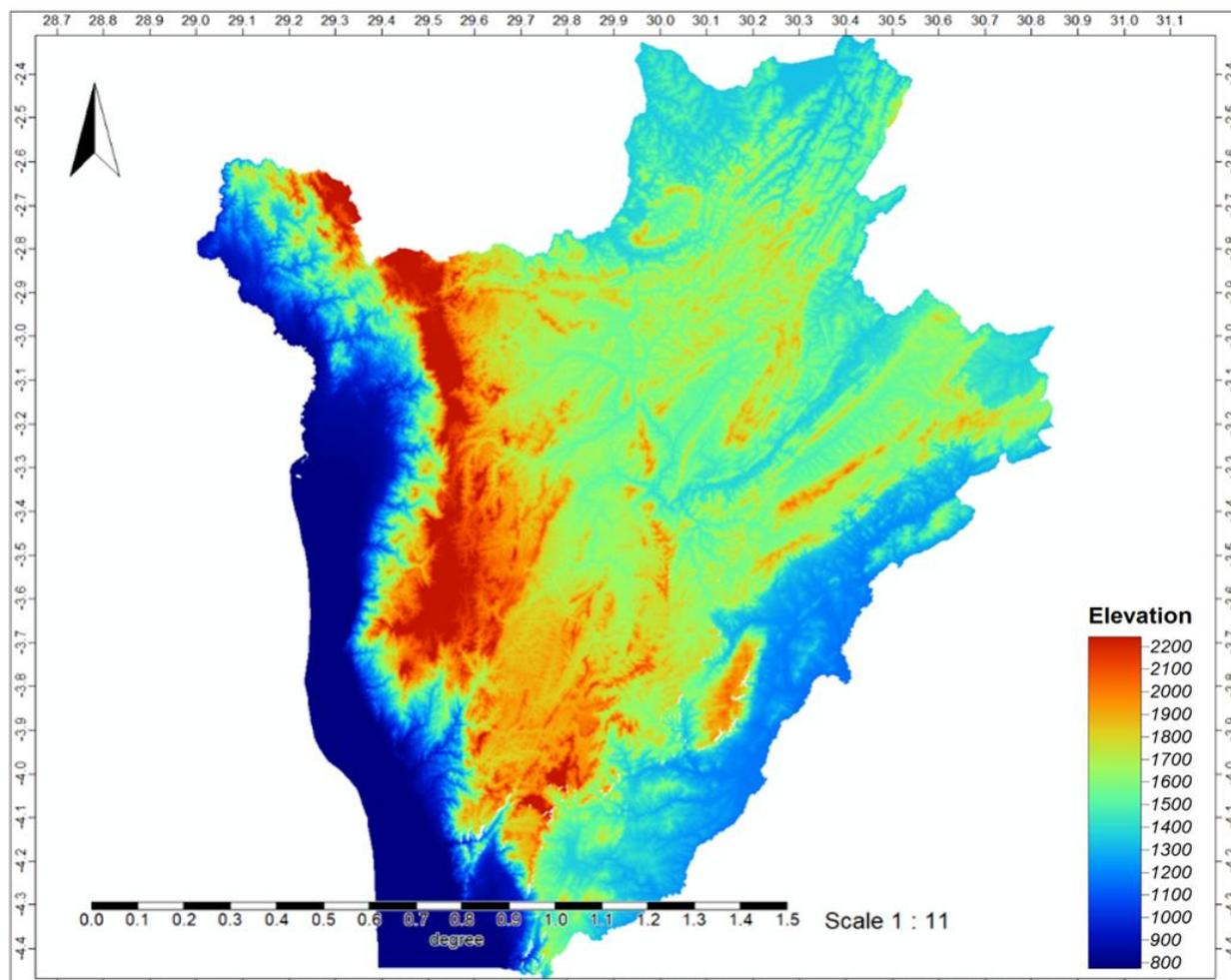


Рис 4. Карта рельефа Бурунди с указанием высоты над уровнем моря.

С помощью цифровой модели рельефа с использованием растровых слоев спутниковых снимков была рассчитана ориентация различных склонов, образованных различными горами Республики Бурунди. Ориентация склонов выражается в градусах и

имеет значения от 0° до 360°. Значение 0° или 360° соответствует ориентации на север, значение 180° – ориентации на юг, значение 90° – ориентации на восток, а значение 270° – ориентации на запад

Для эффективного управления гидрометеорологическими рисками, связанными с осадками и особенно с эрозией, знание ориентации склонов является более важным, поскольку позволяет лицам, принимающим решения, знать, где требуется срочная помощь для предотвращения эрозии. Кроме того, чем круче склон поля и чем длиннее склон, тем выше риск эрозии. Водная эрозия также возрастает с увеличением длины склона из-за увеличения стока. Объединение небольших полей в более крупные часто приводит к увеличению длины склонов. Поскольку вода течет быстрее, увеличивается перенос наносов, что приводит к увеличению риска эрозии и размыва.

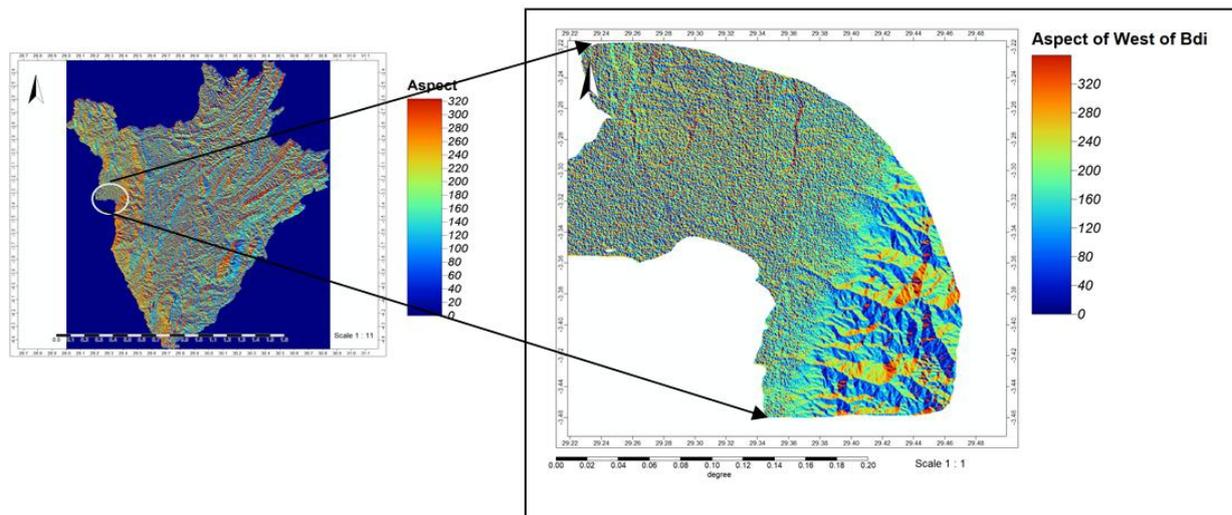


Рис. 5. Карта экспозиции склонов небольшой территории города на западе Бурунди.

Для эффективного управления гидрометеорологическими рисками, связанными, например, с эрозией и наводнениями, очень важно также рассчитать индекс прочности рельефа, чтобы определить, какие поверхности являются равнинными, какие – холмистыми, а какие – умеренно холмистыми. Знание этого индекса позволит определить, какой тип сельскохозяйственной деятельности следует применять в данном регионе. Этот индекс может быть измерен в метрах или дуговых секундах для точек сетки, отстоящих друг от друга на 30 дуговых секунд (926 м на экваторе или любом меридиане).

Индекс пересеченности рельефа характеризует разницу высот между соседними ячейками цифровой модели рельефа. Данная модель растровой функции используется для создания визуального представления индекса устойчивости рельефа с помощью данных о рельефе. Результаты интерпретируются следующим образом:

- 0 – 80 м – плоская поверхность земли;
- 81 – 116 м – почти ровная поверхность;
- 117 – 161 м – слегка неровная поверхность;
- 162 – 239 м – умеренно неровная поверхность;
- 240 – 497 м – умеренно холмистая поверхность;
- 498 – 958 м – очень неровная поверхность;
- 959 – 4367 м – очень холмистая поверхность.

На основе полученных результатов, следует отметить, что рельеф Бурунди в целом усиливается с востока на запад. В центральной части страны значительная часть территории умеренно холмистая, но западная часть, занятая хребтом Конго – Нил, очень холмистая, так как индекс этого региона чуть выше 20 угловых секунд, т.е. чуть выше 600 метров.

Рассчитан топографический позиционный индекс. Этот индекс позволяет выявить регионы с более сложным горным рельефом с более резкими вершинами, что играет роль в управлении рисками, связанными с ливневыми осадками и, прежде всего, эрозией.

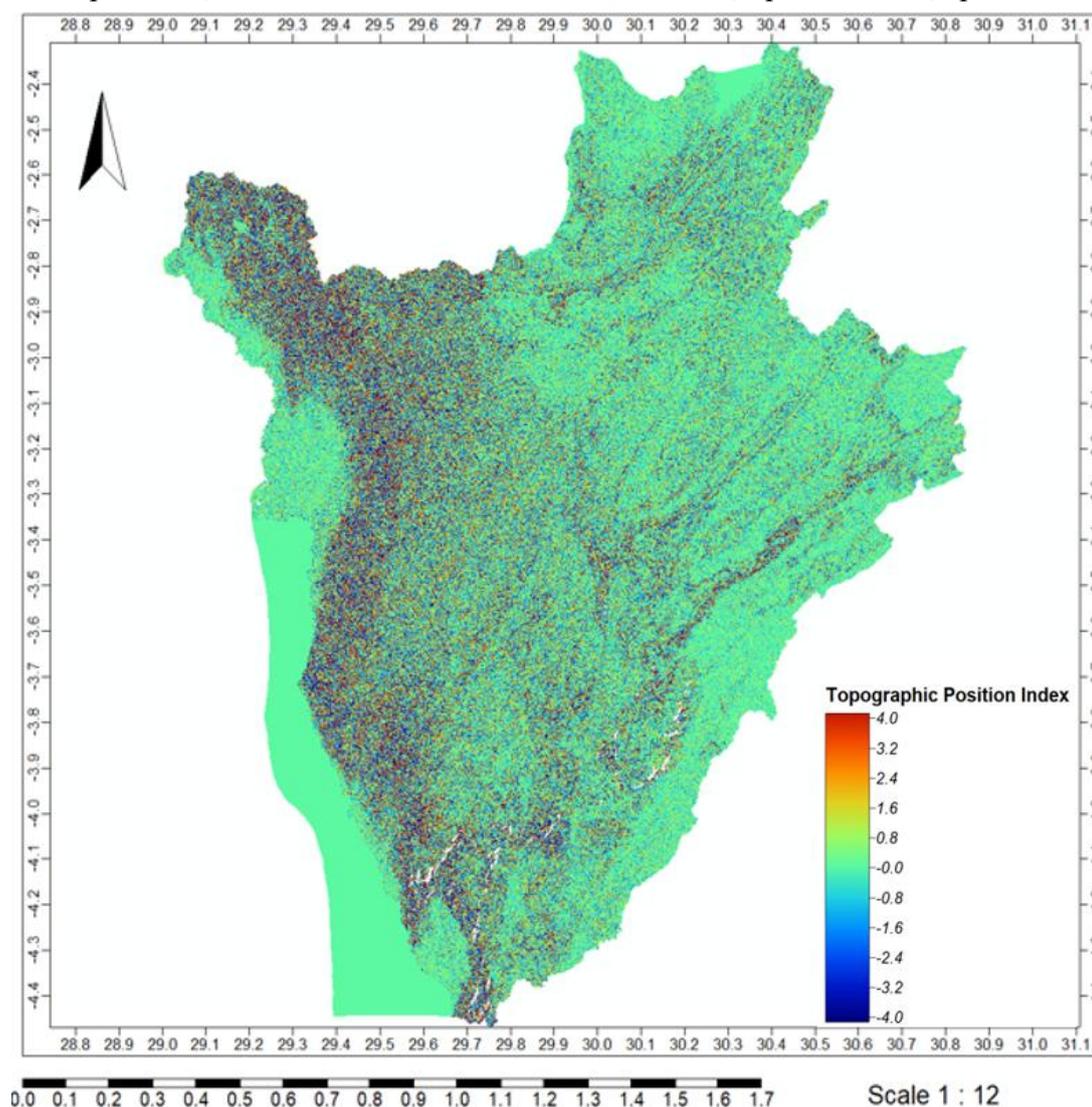


Рис.6. Карта топографического позиционного индекса рельефа Бурунди.

На основе топографического позиционного индекса Бурунди имеет высокие вершины на западе страны в той части, где расположен хребет Конго – Нил, поскольку индекс топографического положения составляет почти 4. Топографический позиционный индекс – это синоним разницы по отношению к средней высоте над уровнем моря, который является абсолютным местным индексом топографического положения. В центре страны этот индекс относительно средний 0,8, что означает наличие гор, которые не имеют большой высоты.

Учитывая, что сельскохозяйственная деятельность в основном зависит от осадков и температурного режима, используя данные об осадках и температуре, собранные на различных станциях с 2010 г. по 2018 г., с помощью анализа этих данных удалось определить различные сельскохозяйственные сезоны в соответствии с особенностями осадков и температуры.

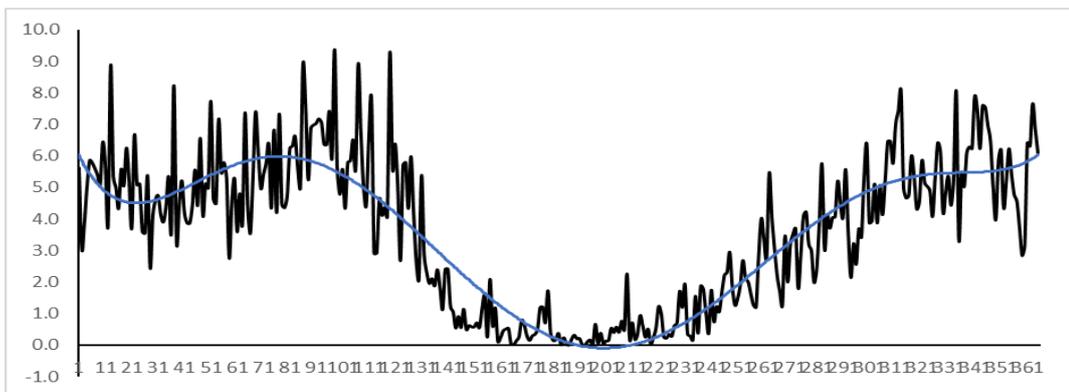


Рис. 7. Годовой ход количество осадков.

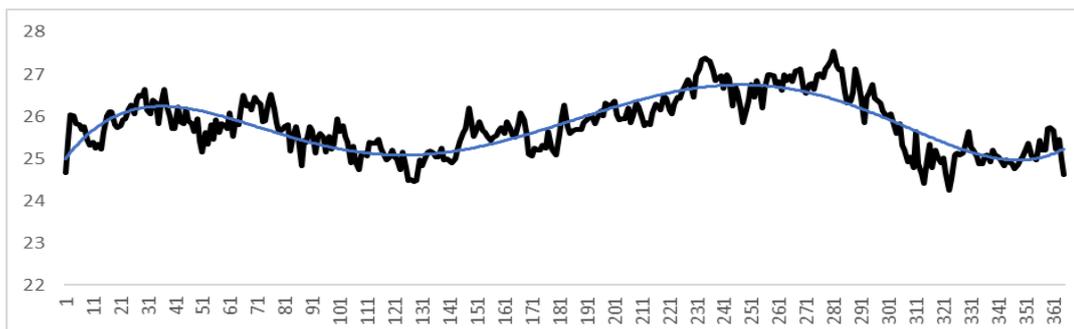


Рис. 8. Годовой ход температуры.

С учетом характера изменения количества осадков и режима годового хода температуры в течение года в Бурунди выделяются три основных периода: с февраля по май, с июня по август и с сентября по январь. В первой фазе, с февраля по май, количество осадков увеличивается, достигая максимума в марте, и вновь уменьшается в мае. Эта фаза соответствует сельскохозяйственному сезону, известному в Бурунди как сезон «В». Вторая фаза, т.е. с июня по сентябрь, как видно из графика на рис. 7, считается периодом, характеризующимся отсутствием осадков. В этот период в течение трех месяцев осадков практически не бывает. Эта фаза соответствует сухому сезону, известному в Бурунди как сельскохозяйственный сезон «С». Третья фаза, с сентября по январь, — это время возвращения выпадения достаточных осадков. На графике видно, что для этого периода характерно увеличение количества осадков с течением времени. Минимум наблюдается в сентябре, максимум — в декабре. В январе наблюдается уменьшение количества осадков. Ссылаясь на типы сезонов, наблюдаемые в Бурунди, можно сказать, что эта фаза соответствует сельскохозяйственному сезону, известному как сезон «А».

При сравнении графика на рис. 8 с графиком на рис. 7 видно, что в сезон дождей температура снижается, а в сухой сезон — повышается. Это подтверждается тем, что между температурным режимом и режимом осадков существует отрицательная корреляция, так как коэффициент корреляции составляет  $-0,4$ .

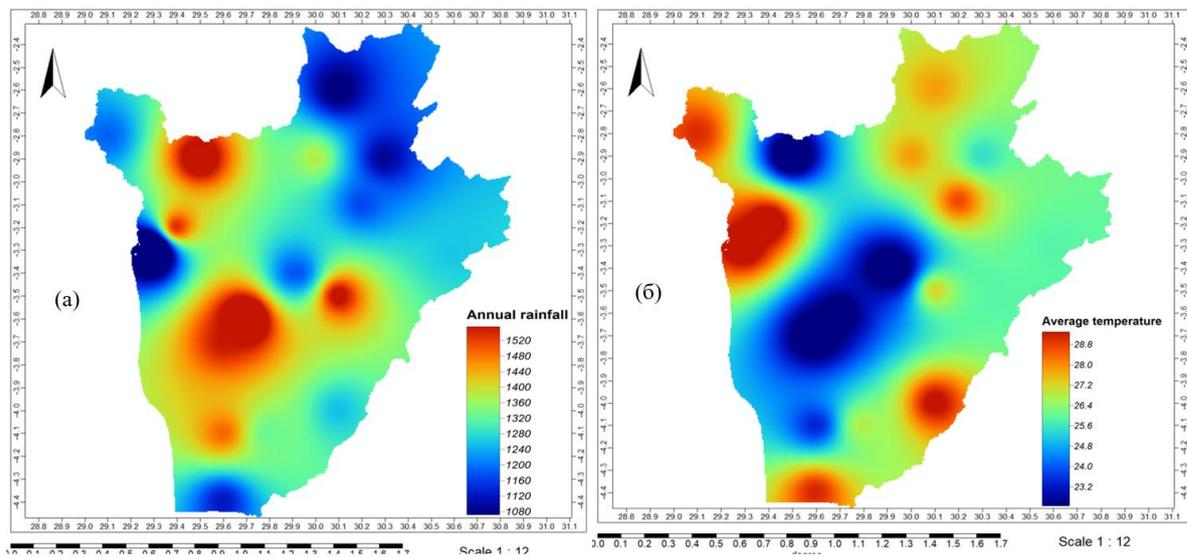


Рис. 9. Среднегодовое количество осадков (а), режим среднегодовой температуры (б).

По пространственному распределению среднегодового количества осадков в западном регионе Бурунди имеются очаги повышенного количества осадков, причем эти осадки выпадают на участках с высоким рельефом и наиболее значительными уклонами. Используя результаты на рис. 4, 5, 6 и 9а, можно установить, почему западный равнинный регион страны (равнина Имбо) часто подвергается наводнениям по сравнению с остальной территорией страны. С помощью этих же рисунков можно понять, почему этот регион часто подвергается эрозии, поскольку, во-первых, он имеет крутые склоны, во-вторых, здесь выпадает большое количество осадков. Для северо-восточного региона характерно минимальное количество осадков по сравнению с общим распределением осадков, поэтому можно понять, что этот регион будет очень подвержен сельскохозяйственной засухе по некоторым культурам.

Высокие температуры увеличивают испарение воды, делая почву более сухой. В свою очередь, уменьшение количества водяного пара в воздухе способствует его нагреванию. Говоря об управлении рисками в сельскохозяйственном секторе, необходимо учитывать температурный режим, чтобы понять, какие регионы наиболее подвержены засухе.

На основании рис. 9а и 9б северо-восточный регион страны будет подвержен засухе в гораздо большей степени, чем все остальные регионы страны, так как в нем выпадает минимальное количество осадков в год и наблюдается высокая средняя температура.

В рамках поставленных задач проведены статистические исследования данных о температуре и количестве осадков, собранных в различных регионах Бурунди, чтобы получить представление об их поведении на основе ключевых показателей для эффективного управления рисками в сельскохозяйственном секторе.

Этот анализ был проведен для определения подходящих средств прогнозирования и управления рисками, связанными с температурой и осадками. Поскольку температура и осадки варьируются в каждом году по-разному в зависимости от месяца и сезона, ряды данных о температуре и осадках были проанализированы в соответствии с тремя сельскохозяйственными сезонами, которые встречаются в Бурунди, и каждый параметр был проанализирован как случайный процесс. Каждый случайный процесс состоит из девяти реализаций, соответствующих 9 годам анализируемых данных.

Пусть дискретный случайный процесс представлен временным рядом:

$X(n); X(n-1); \dots; (X(n-M))$ , среднее определяется как:

$$\mu_x(n) = M\{X(n)\} \quad (15),$$

где  $M\{\cdot\}$  – оператор математического ожидания. Аналогично, автокорреляция принимает форму [5]:

$$r(n, n-k) = M\{X(n)X^*(n-k)\}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (16),$$

где звездочка обозначает комплексное сопряжение. Функция автоковариации записывается:

$$c(n, n-k) = M[X(n) - \mu_x(n)][X^*(n-k) - \mu_x^*(n-k)]; \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (17).$$

Процесс является строго стационарным, если все его моменты не зависят от времени. Считается, что процесс является слабостационарным, или стационарным в широком смысле, если:

$$\mu_x(n) = \mu \quad \forall n \quad (18),$$

$$r(n, n-k) = r(k) \quad \forall n \quad (19).$$

Пусть  $X$  – это ряд значений размера  $n$ , среднего  $m$  и стандартного отклонения  $S$ . Сравнение наблюдаемого среднего значения ( $m$ ) с теоретическим значением  $\mu$  позволяет рассчитать коэффициент Стьюдента по следующей формуле:

$$t_\phi = \frac{\mu - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \quad (20).$$

Был рассчитан критерий Стьюдента для проверки наличия стационарности в рядах данных, используемых для выбора подходящего метода управления рисками.

Итак, нужно сравнить среднее значение  $\mu$  совокупности с нормальным распределением и неизвестным стандартным отклонением  $\sigma$  с заданным значением  $\mu_0$ . Нулевой гипотезой является  $H_0: \mu = \mu_0$ , т.е. предварительно предполагается, что среднее значение равно  $\mu_0$ . Теперь мы подставим себя под нулевую гипотезу. Рассматривается выборка размером  $n$  из этой совокупности  $(X_1, \dots, X_n)$ . Среднее значение оценивается по эмпирическому среднему:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (21).$$

При нулевой гипотезе распределение среднего  $\bar{X}$  также распределяется нормально со стандартным отклонением  $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . Поскольку дисперсия  $\sigma^2$  неизвестна, она оценивается с помощью собственного несмещенного показателя:

$$S_n^{*2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2 \quad (22).$$

По теореме Кокрана при нулевой гипотезе, следуя закону  $\chi_u$  Квадрата с  $n-1$  степенями свободы, применяется следующая тестовая статистика:

$$Z = \sqrt{n} \frac{\bar{X}_n - \mu_0}{S_n^*} \quad (23).$$

Статистика  $Z$  следует распределению Стьюдента с  $n-1$  степенью свободы. Выбираем риск  $\alpha$ , обычно равный 0,05 или 0,01 и вычисляем реализацию тестовой статистики:

$$Z = \sqrt{n} \frac{\bar{X}_n - \mu_0}{S_n^*}, \text{ или } S_n^* = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2} \quad (24).$$

Пусть необходимо проверить  $H_0 = \mu = \mu_0$ . Таким образом, если  $|Z|$  больше квантиля порядка  $1 - \frac{\alpha}{2}$  Закон Стьюдента с  $n-1$  степенями свободы, то отвергается нулевая гипотеза.

Случай, когда нужно проверить  $H_0 = \mu \leq \mu_0$ : если  $z$  больше квантиля порядка  $1 - \alpha$  закона Стьюдента с  $n-1$  степенями свободы, то отвергается нулевая гипотеза.

Случай, когда нужно проверить  $H_0 = \mu \geq \mu_0$ : если  $z$  меньше квантиля порядка  $\alpha$  закона Стьюдента с  $n - 1$  степенями свободы, то отвергается нулевая гипотеза.

Чтобы узнать, является ли разница значимой, необходимо сначала прочитать в  $t$ -таблице критическое значение  $t_k$ , соответствующее риску  $\alpha$  для одной степени свободы  $d$ :

$$d = n - 1 \quad (25).$$

Если абсолютное значение  $t_\phi$  больше критического значения  $t_k$ , то разница значима. Если нет, то она не является значительной.

Процесс считается строго стационарным, если  $t_\phi$  меньше критического значения  $t_k$ .

Проведен корреляционный анализ между рядами температурных данных и рядами данных об осадках.

Коэффициент корреляции может быть представлен формулой:

$$r_{xy} = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 * (\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (26).$$

Коэффициент корреляции  $r$  представляет собой безразмерное значение от  $-1$  до  $1$ .

Анализируя полученные значения автокорреляционной функции для температуры и для количества осадков для трех сезонов, можно сделать вывод о наличии четкой линейной тенденции в исследуемом временном ряду, что дает основание утверждать, что эти параметры не зависят от времени.

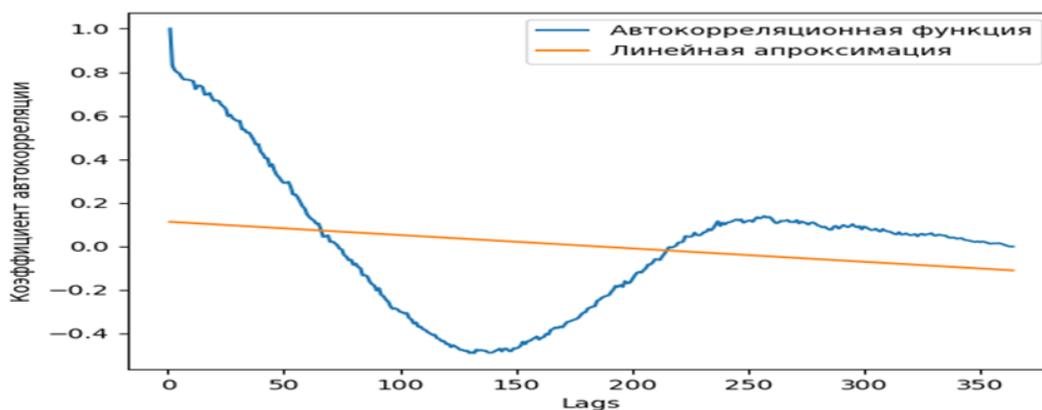


Рис.10. Автокорреляционная функция количества осадков в Бурунди.

Поскольку автокорреляция используется для измерения связи между текущими и прошлыми рядами значений, она показывает, какие прошлые значения наиболее полезны для прогнозирования будущих значений. На основании рисунка 10 видно, что при прогнозировании поведения ряда осадков можно делать прогноз на 20 дней вперед, так как связь между текущим значением и значением 20 днями ранее сильная, поскольку в этом диапазоне коэффициент автокорреляции больше 0,7, что означает наличие сильной связи. Если проанализировать также линейную функцию аппроксимации автокорреляционной функции, то хорошо заметно, что она практически не изменяется, так как весь коэффициент автокорреляции меняется в диапазоне от 0 до 0,14. Это позволяет сделать вывод о том, что годовой ряд осадков является стационарным.

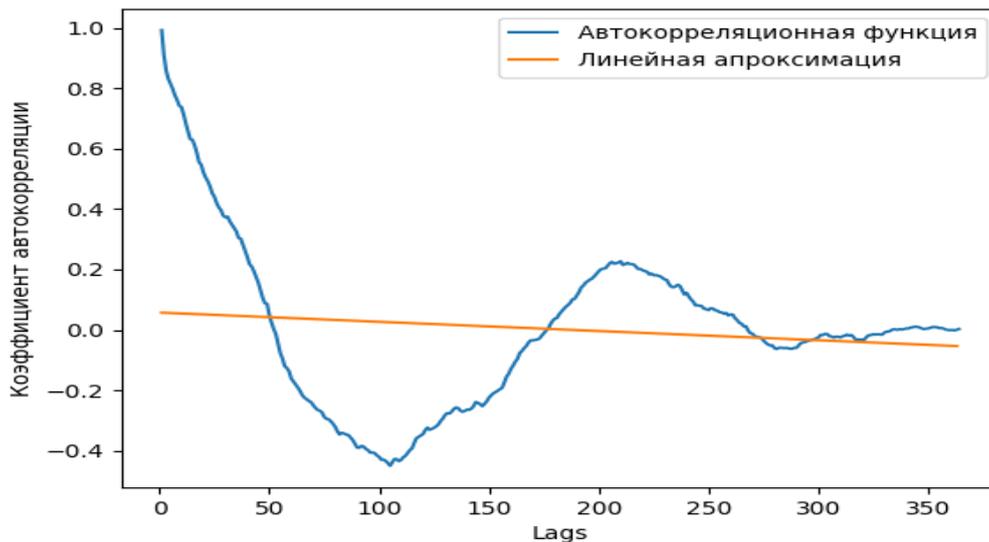


Рис.11. Автокорреляционная функция температур в Бужумбуре (Бурунди).

На основании анализа автокорреляционной функции можно отметить, что между текущими и предыдущими значениями температуры существует сильная связь, поскольку коэффициент автокорреляции остается высоким до десятого дня. Это означает, что, используя текущие значения температуры, можно предсказать ее поведение на период 10 дней. Анализ линейной функции аппроксимации автокорреляционной функции приводит к выводу, что температурный ряд является стационарным, так как она практически не меняется во времени.

Проведенные анализы с использованием автокорреляционной функции для различных рядов сезонных данных о температуре и осадках позволяют утверждать, что можно использовать исторические данные в качестве основы для краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов. Согласно полученным результатам автокорреляционной функции для получения более надежного прогноза целесообразно строить прогноз на период, сопоставимый с диапазоном, в течение которого коэффициент автокорреляции остается сильным.

Учитывая, что для управления гидрометеорологическими рисками, угрожающими сельскохозяйственному сектору Бурунди, необходимо построить модель на основе фактических данных (температура, количество осадков и др.), очевидно, что она должна учитывать особенности динамики имеющихся данных. Для этого необходимо знать распределение Стьюдента, которое используется для проверки гипотез о значимости регрессионных моделей. Это позволит оценить математическое ожидание нормально распределенных случайных величин при малом объеме выборки, а также значимость разницы между средними двух выборок. С помощью этого критерия удастся определить, являются ли данные стационарными или нет.

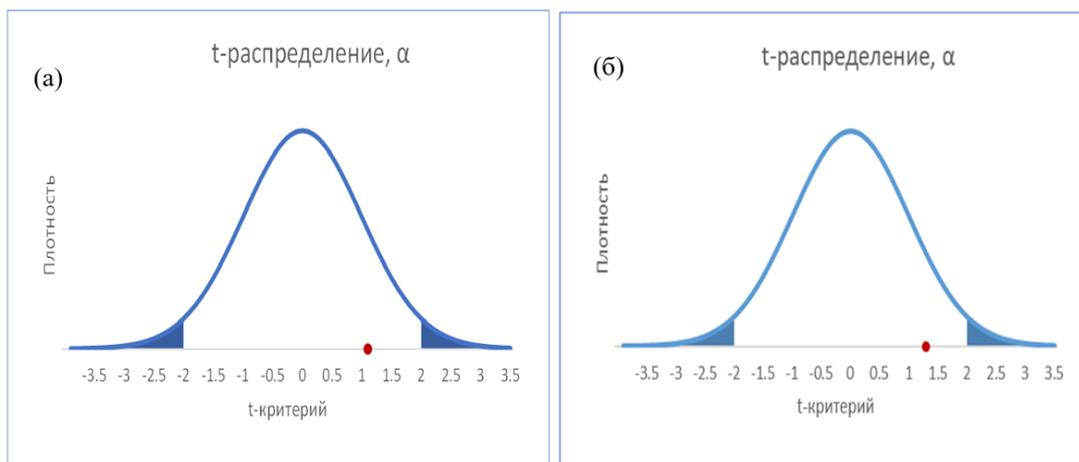


Рис. 12. t-распределение в Кирундо по температуре (а), t-распределение в Гитега по данным количества осадков (б).

Для проверки стационарности использовался коэффициент значимости 5%. В результате анализа данных о температуре и количестве осадков, собранных на различных метеостанциях в Бурунди, было установлено, что эти данные являются стационарными.

Таб.1. Расчет t-Критерия по данным количества осадков в Гитега

| Показатель      | Значение |
|-----------------|----------|
| $\mu$           | 3.3      |
| $X_{\text{ср}}$ | 3.4      |
| n               | 153      |
| s               | 0.94     |
| tфакт           | 1.315885 |
| $\alpha$        | 0.05     |
| d.f.            | 152      |
| tкритич         | 1.976    |
| p-value         | 0.190194 |

Таб.2. Расчет t-Критерия по данным температуры в Кирундо

| Показатель      | Значение |
|-----------------|----------|
| $\mu$           | 27.6     |
| $X_{\text{ср}}$ | 27.7     |
| n               | 92       |
| s               | 0.9      |
| tфакт           | 1.06574  |
| $\alpha$        | 0.05     |
| d.f.            | 91       |
| tкритич         | 1.986    |
| p-value         | 0.289361 |

*Научная новизна* заключается в том, что физико-географические свойства Бурунди определены с помощью различных информационных моделей Географической информационной системы на основе анализа спутниковых снимков. Впервые определены методики прогнозирования гидрометеорологических рисков для сельскохозяйственного комплекса Бурунди, основанные на статистическом анализе динамических гидрометеорологических данных.

**В четвертой главе** рассмотрены принципы работы геоинформационной модели, разработанной для поддержки принятия решений по управлению гидрометеорологическими рисками в агропромышленном комплексе на основе задач и целей исследования, поставленных в данной диссертации. Представлен метод индикаторного подхода для визуализации георисков, связанных с сельскохозяйственной деятельностью. Рассмотрены основные компоненты геоинформационной модели оценки георисков. Раскрывается взаимодействие между геоинформационной моделью оценки георисков, базами данных и способом визуализацией рисков через веб-браузер с целью представления в реальном

времени географических рисков, препятствующих сельскохозяйственной деятельности. Способ визуализации рисков основан на пространственном представлении показателей риска, которое обеспечивается геоинформационной моделью, представленной во второй главе диссертации. Визуализация заключается в генерации карты, иллюстрирующей распределение рисков на определенной территории. Используя эту визуализацию рисков, лица, принимающие решения, могут принимать рациональные решения, направленные на ограничение потерь в сельскохозяйственном секторе.

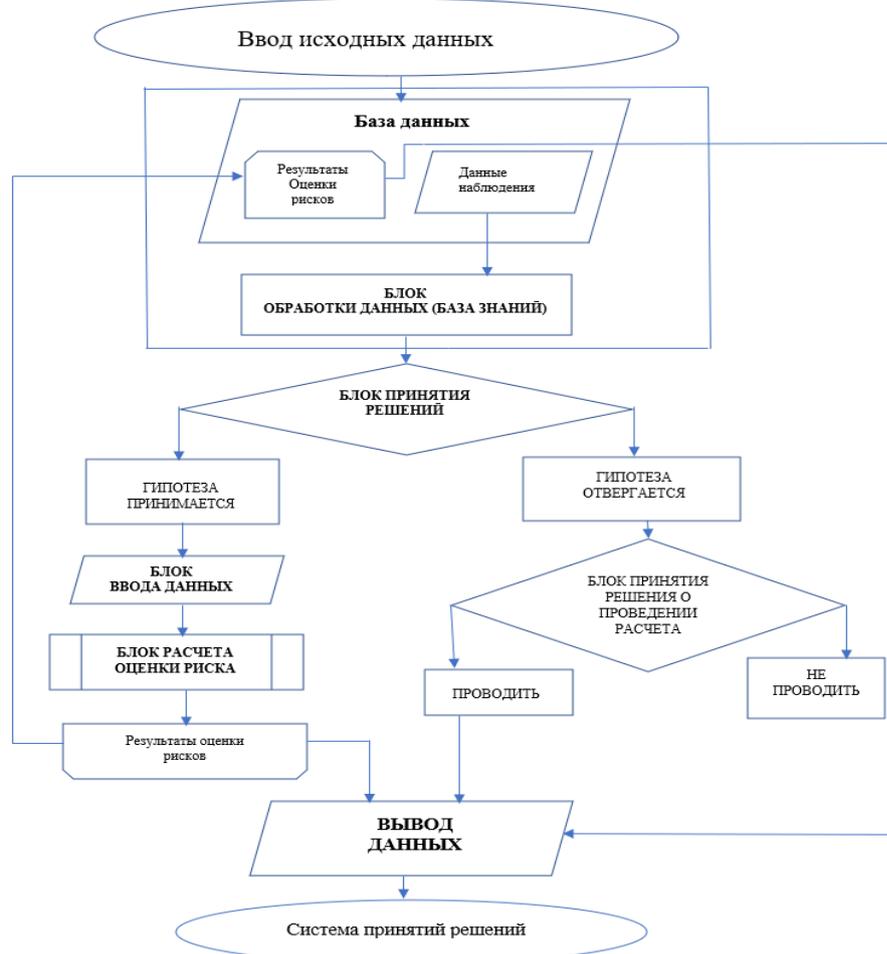


Рис. 13. Блок-схема алгоритма реализации геоинформационной модели оценки гидрометеорологических рисков сельского хозяйства.

В соответствии со схемой геоинформационной модели оценки георисков были созданы базы данных. Эти базы данных привязаны к конкретным географическим координатам. Основные параметры, которые сохраняются в базах данных, являются следующими: данные по осадкам, данные по температурам, среднее значение температуры, название станции, среднее квадратическое отклонение, дисперсия, коэффициент риска, коэффициент ущерба.

Благодаря расширению PostGis, установленному в базе данных, исходные данные и полученные результаты могут быть представлены на пространственной карте непосредственно в базе данных (рис. 14), и это дает возможность увидеть различные характеристики, встречающиеся в разных местностях [62, 110].

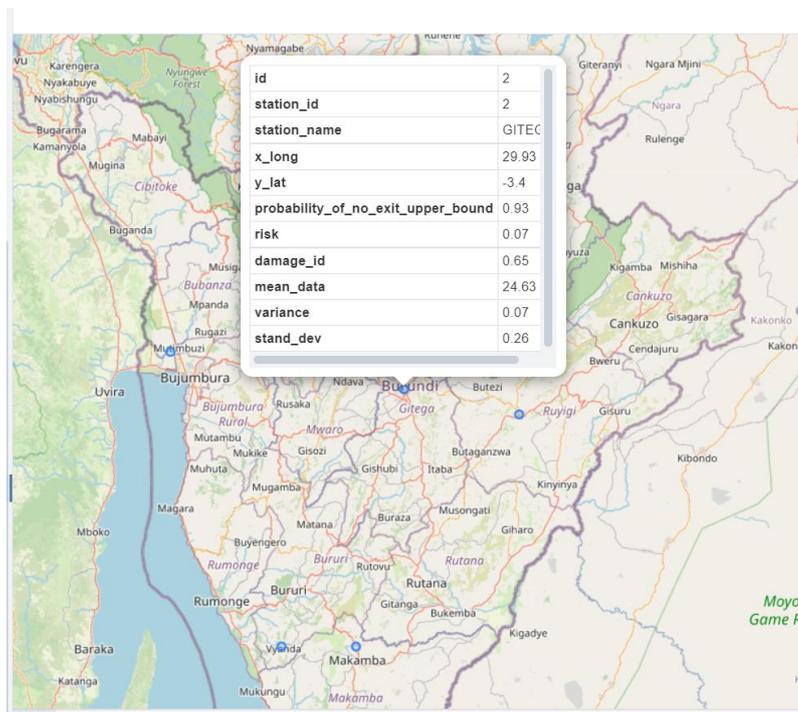


Рис. 14. Картографическое представление характеристик регионов Бурунди в геоинформационной системе.

На карте (рис. 14), созданной непосредственно в базе данных, можно увидеть различные значения статистических характеристик, а также значения риска, связанные с температурой воздуха в указанной точке [62, 110, 87].

При нажатии на точку, отмеченную на карте, можно сразу выводить информацию о различных данных, соответствующих характеристикам этого места, как это показано на карте в базе данных (рис 14). Как уже упоминалось, каждая точка содержит идентификатор (id) каждого столбца, идентификатор каждой станции (station\_id), название станции (station\_name), долготу (x\_long), широту (y\_lat), вероятность невыхода из заданного предела (probability\_of\_no\_exit\_upper\_bound), коэффициент риска (risk), коэффициент ущерба (damage\_id), среднее значение, дисперсию (variance) и среднеквадратическое отклонение (stand\_dev).

Коэффициент риска представляет собой вероятность того, что случайный процесс выходит за заданный предел, при условии, что значение этого процесса в начальный момент времени известно, и он обратно пропорционален вероятности того, что процесс не выходит за заданный предел.

Коэффициент ущерба, в свою очередь, является показателем, характеризующим возможные сельскохозяйственные потери в зависимости от заданного уровня риска. Коэффициент риска прямо пропорционален коэффициенту ущерба. В сельскохозяйственном секторе, особенно в Бурунди, риск напрямую связан со случайными колебаниями суточной температуры и количества осадков. Несмотря на то, что климатические условия для развития той или иной культуры (растения) известны заранее, как и данные о средней температуре и количестве осадков для различных регионов, следует отметить, что эти параметры имеют динамические изменения, и их колебания могут сопровождаться огромными потерями. Применение коэффициентов ущерба и риска является важным решением для правильного управления сельским хозяйством.

Исследования показывают, что повышение температуры может сократить период созревания сельскохозяйственных культур, что в свою очередь может снизить общую урожайность из-за ухудшения способности растений удерживать и использовать влагу. Обильные осадки также играют важную роль в появлении рисков, с которыми сталкивается сельскохозяйственный сектор. Избыточное количество осадков может привести к

наводнению и эрозии, что нанесет значительный ущерб урожаю. Учитывая прогнозируемые показатели риска и ущерба от осадков, необходимо разработать соответствующие стратегии минимизации потери с помощью предупредительных мер инженерно-технического характера, таких как уменьшение максимального расхода в реке путем перераспределения стока во времени, сооружение ограждающих дамб (валов), спрямление русла рек, подсыпка территорий, берегоукрепительные и дноукрепительные работы, регулирование стока паводка (половодья) с помощью водохранилищ, применение комбинированного способа профилактики наводнений. Также, с учетом степени прогнозируемого коэффициента риска и, опираясь на коэффициент ущерба, в случае превышении заданного температурного порога (уровня), лица, принимающие решения, могут выбрать подходящую норму (ритм) полива или откачки воды для повышения урожайности и, соответственно, минимизации потерь.

Модель, разработанная для поддержки принятия решений по управлению рисками в агропромышленном комплексе, позволяет получать информацию о показателях риска или потерь на интерактивной карте через любой веб-браузер. Она также предлагает возможность выбора референтного уровня, от которого пользователь предпочитает видеть прогноз риска, что позволяет лицам, принимающим решения, и фермерам учитывать прогноз риска или индикатора ущерба в соответствии с климатическими условиями конкретного растения.

#### Управление рисками в Бурунди

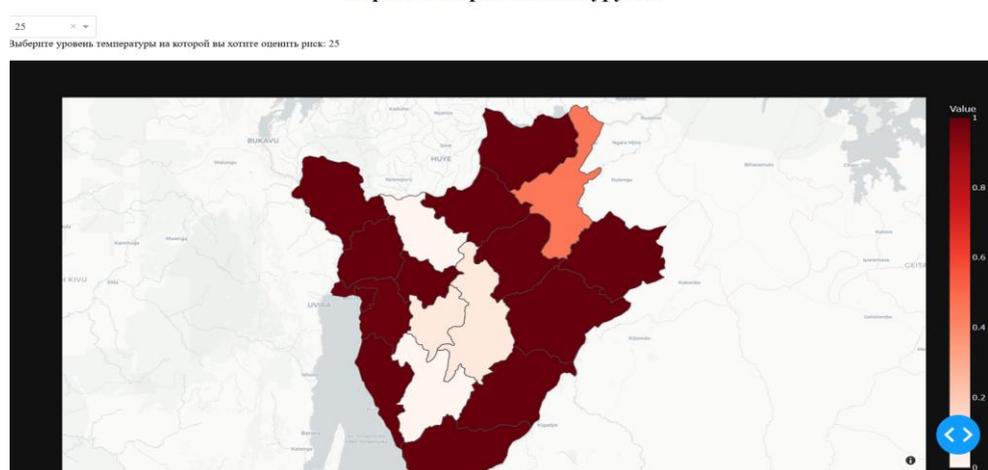


Рис.15. Геоинформационная карта, иллюстрирующая риск, связанный с температурой выше 25°C.

В четвертой главе также представлены методы верификации результатов, полученных с помощью разработанной модели; рекомендации и методики использования разработанной модели для поддержки принятия решений с учетом конкретных потребностей фермеров. По результатам проверок эффективности разработанной модели был сделан вывод, что модель обеспечивает надежные результаты с погрешностью менее 5 %. Также было отмечено, что модель может быть использована для составления многопараметрических прогнозов при соблюдении основных принципов ее работы, особенно при стационарных рядах исторических данных.

*Научная новизна* заключается в разработке географической информационной модели для управления гидрометеорологическими рисками в агропромышленном комплексе, отвечающей потребностям пользователей и позволяющей прогнозировать показатели риска и ущерба в зависимости от конкретных климатических условий для конкретного растения. Впервые представлены рекомендации и методики использования разработанной модели.

#### Заключение

В ходе проведенного исследования автором были получены следующие результаты:

1. Проведен анализ геоэкономической обстановки в Республике Бурунди. Экономическая обстановка, в которой находится Бурунди в последнее время, требует совершенствования методов работы в сочетании с эффективным управлением гидрометеорологическими рисками для увеличения сельскохозяйственного производства, которое является основным источником экономики Бурунди.

2. В ходе исследования было отмечено, что осадки и температура остаются основными причинами рисков, угрожающих сельскохозяйственной деятельности в Бурунди, среди которых можно выделить наводнения, эрозию и засуху.

3. В результате анализа различных методов было отмечено, что предложенные методы в различных национальных планах по управлению гидрометеорологическими рисками, связанными с чрезвычайными климатическими ситуациями, носят теоретический характер и не представляют конкретных научных методов контроля рисков из-за нехватки квалифицированных кадров в области управления рисками с использованием современных научных методик.

4. В ходе анализа на основе географических информационных систем удалось установить геофизические факторы Бурунди, которые определяют ее подверженность различным климатическим угрозам. Используя анализ спутниковых снимков физического ландшафта Бурунди, удалось рассчитать такие индексы, как индекс пересеченности, индекс топографического положения рельефа, индекс экспозиции склонов и высоту возвышенности Бурунди. Эти индексы позволили сделать вывод о том, что геофизические характеристики Бурунди благоприятствуют возникновению наводнений, эрозии и засухи на значительной части территории страны. Согласно индексам Бурунди имеет очень гористый рельеф, который способствует усилению гидрометеорологических рисков, связанных с ливневыми дождями.

5. Проведен общий обзор значимости использования геоинформатики в управлении гидрометеорологическими рисками. Были проанализированы основные свойства географических информационных систем и их применение в различных секторах. Также проведен общий обзор использования географических информационных систем в различных секторах.

6. Автор провел широкий анализ работы отечественных и зарубежных ученых и организаций в области математического моделирования и оценки рисков на основе использования априорных географических данных. Был выявлен ряд проблем и нерешенных вопросов, которые были учтены в данной диссертации.

7. Разработана модель оценки гидрометеорологических рисков для сельскохозяйственного сектора. Она позволяет управлять гидрометеорологическими рисками, связанными с сельскохозяйственным сектором, в зависимости от текущих значений параметров. Модель предполагает возможность использования постоянно обновляемых статистических данных.

8. Разработана информационная система обработки географических данных для оценки рисков. Эта модель используется для прогнозирования показателя риска и коэффициента ущерба.

9. Анализ результатов, полученных с помощью этой модели, показал ее высокую эффективность и высокую значимость с точки зрения принятия решений по минимизации или снижению рисков.

#### ***Список публикаций по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:***

1. Ндикумана Э. Управление стихийными бедствиями, связанным с эрозией в республике Бурунди / Е. П. Истомина, Н. В. Яготинцева, Э. Ндикумана // Информация и Космос. – 2022. – №4. – С. 124–131.

2. Ндикумана Э. Применения параметрической модели оценки рисков для сельскохозяйственных регионов Республики Бурунди / Э. Ндикумана, Е. П. Истомина, Н. В. Яготинцева. Электронный ресурс. Режим доступа: [https://www.infokosmo.ru/ru/article/17173/primeneniya\\_parametricheskoy\\_modeli\\_ocenki\\_risikov\\_dlyaselskohozyaystvennyh\\_regionov\\_respubliki\\_burundi/](https://www.infokosmo.ru/ru/article/17173/primeneniya_parametricheskoy_modeli_ocenki_risikov_dlyaselskohozyaystvennyh_regionov_respubliki_burundi/)

3. Ндикумана Э. Геоинформационная модель для управления рисками в Бурунди / Э. Ндикумана, Е. П. Истомина, Н. В. Яготинцева // Геоинформатика. – 2024. – №1. – С.16-24.

#### ***Публикации в других изданиях:***

4. Ндикумана Э. Геоинформационное управление рисками сельскохозяйственных районов в республике Бурунди / Э. Ндикумана // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО2022). Сборник научных статей XI Международной научно-технической и научно-методической конференции. Т.2. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им.проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2022. – С. 423-426.

**Научные конференции:**

1. Ндикумана Э. геоинформационное управление рисками сельскохозяйственных районов в республике Бурунди // -XI международная научно-техническая и научно-методическая конференция «актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» 15-16 февраля 2022.

2. Ндикумана Э. Применение Qgis для мониторинга сельскохозяйственных рисков в республике Бурунди // - Инновационное развитие информационных систем и технологий в гидрометеорологии. 12 апреля 2022.

3. Ндикумана Э. Значимость геоинформатики в управлении георисками // - Научно-практической конференции молодых ученых инфогео 2023 «информационные системы в Арктике». 7 ноября 2023.

**Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и БД:**

1.№2024621470 от 03.04.2024 «база данных системы поддержки управления рисками сельскохозяйственной деятельности »