

На правах рукописи



Рябинин Иван Валерьевич

**МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО МИКРОВОЛНОВОГО
МОНИТОРИНГА ПОЧВЕННЫХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЗАСУХ**

Специальность 1.6.16 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2026

Работа выполнена в Лаборатории физики атмосферно-гидросферных процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН).

Научный руководитель: **Романов Андрей Николаевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий Лабораторией физики атмосферно-гидросферных процессов Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул.

Официальные оппоненты: **Болгов Михаил Васильевич**, доктор технических наук, заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт водных проблем РАН, г. Москва.

Яценко Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН, г. Омск.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Защита состоится «19» ноября 2026 г. в 10:00 час. на заседании диссертационного совета 24.1.039.01 в Институте водных и экологических проблем СО РАН по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, факс: (3852) 24-03-96, e-mail: iwer@iwer.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных и экологических проблем СО РАН и на сайте организации <https://iwer.ru/>.

Автореферат разослан «___» сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Д.Г.Н., доцент



И.Д. Рыбкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Почвенные и гидрологические засухи относятся к опасным природным явлениям, возникающим при количестве выпадающих атмосферных осадков ниже нормы, и характеризуются региональными (часто уникальными) особенностями. Детальное изучение современных гидролого-климатических изменений необходимо для достоверного прогнозирования засух. Для оценки почвенных и гидрологических засух могут быть использованы всепогодные микроволновые методы дистанционного зондирования.

Традиционные наземные наблюдения часто оказываются недостаточными: они покрывают ограниченные территории, имеют задержки в передаче данных и не способны обеспечить своевременное обнаружение быстро развивающихся процессов. Для выявления и прогнозирования засух, получения достоверной и оперативной информации, необходимой для уменьшения экономических рисков, снижения социальной напряженности в обществе, является важной научной проблемой разработка методов дистанционного микроволнового мониторинга, основанных на использовании данных аэрокосмического зондирования.

Степень разработанности темы исследования. Широкомасштабные исследования по уменьшению негативного воздействия засух на природные экосистемы ведутся в разных регионах России, в Центральной Азии, Казахстане, Кыргызстане, Монголии, Индии, Иране, Греции, Китае, Чехии, Англии, США и других странах. Результаты исследований засух в разных странах мира представлены в трудах многих учёных (Виноградова В.В., Владимиров А.М., Галахов В.П., Добровольский С.Г., Золотокрылин А.Н., Калинина Н.В., Лебедева (Верба) М.П., Лопухина О.В., Магрицкий Д.В., Малышева Н.Г., Рочева Э.В., Степаненко В.М., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Щербенко Е.В., Abuduwaili Jilili, Alim Samat, AghaKouchak A., Singh A., B. Wu, Z. Ma, N. Yan, Indoitu R., J. Wenzhe и др.). Подробное описание степени разработанности темы исследования приведено в §1.1 и §1.3.

Целью диссертационного исследования является разработка методов дистанционного микроволнового мониторинга, позволяющих оценивать масштабы и интенсивность проявления почвенной и гидрологической засух.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*:

1. Проанализировать и обобщить существующие подходы к дистанционному мониторингу гидрологических процессов и явлений.
2. Оценить особенности проявления засух на тестовых объектах на юге Западной Сибири и в Центральной Азии.
3. Выявить существующие связи между почвенно-гидрологическими процессами и излучательными характеристиками подстилающей поверхности:
 - 3.1 Установить зависимости между почвенной засухой и сезонной динамикой излучательных характеристик подстилающей поверхности.
 - 3.2 Установить зависимости между гидрологической засухой (усыханием озер) и многолетней динамикой излучательных характеристик подстилающей поверхности.
4. Разработать методы дистанционного мониторинга почвенных и гидрологических засух и предложить новые индексы с апробацией на тестовых участках:
 - 4.1 Дистанционный микроволновый индекс почвенной засухи.
 - 4.2 Дистанционный микроволновый индекс гидрологической засухи.

Объекты исследования: почвенно-гидрологические процессы и явления на водных объектах.

Предмет исследования:

1. Закономерности и особенности излучательных характеристик почвенного покрова в условиях почвенной засухи;
2. Закономерности и особенности излучательных характеристик солёных озёр в условиях усыхания.

Исследования проводились на природных водоёмах суши и прилегающих к ним территориях: 1) Кулундинское озеро, испытывающее периодические процессы усыхания/обводнения; 2) участки катастрофически усохшего Аральского моря и образовавшаяся на их местах песчано-солончаковая пустыня Аралкум; 3) бессточное озеро Сарыкамыш с повышающейся соленостью воды в результате приёма промывочных вод с орошаемых полей; 4) Каспийское море и залив Кара-Богаз-Гол.

Научная новизна:

1. Разработана новая методика определения продолжительности периодов открытой воды по спутниковым измерениям яркостных температур, апробированная на

примере внутренних водоёмов Северной Евразии. Данная методика позволяет оценить с точностью до суток продолжительности гидрологических фаз водного объекта.

2. Впервые разработан и апробирован на примере Кулундинского озера дистанционный микроволновый индекс гидрологической засухи, основанный на учёте различий яркостных температур водной поверхности, почвенного покрова и осушенного дна. Данный индекс позволяет оценить степень усыхания минерального озера и выявить направленность гидрологических процессов, связанных с аридизацией территории.

3. Впервые разработан и апробирован на юге Западной Сибири дистанционный микроволновый индекс почвенной засухи, основанный на использовании спутниковых измерений яркостных температур и лабораторных измерений диэлектрических характеристик почвы. Данный индекс позволяет оценить интенсивность почвенной засухи.

4. Впервые построена карта-схема пространственного распределения дистанционного индекса, характеризующая масштабы почвенной засухи на территории Алтайского края.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны оперативные методы дистанционного микроволнового мониторинга внутренних водоемов суши (на примере солёных озёр Северной Евразии), предназначенные для дистанционной оценки гидрологических изменений внутренних водоемов суши и прилегающих к ним территорий.

2. Разработаны новые дистанционные микроволновые индексы, позволяющие оценить масштабы и интенсивность почвенных и гидрологических засух.

Практическая значимость работы:

1. Результаты диссертационной работы могут быть использованы на степных территориях Алтайского края, Омской, Новосибирской, Оренбургской областей, северного Казахстана, а также на других территориях с похожими почвами.

2. Разработанные дистанционные микроволновые индикаторы засухи, а также методики их оценки могут быть использованы в других регионах мира для оценки экстремальных случаев влагообеспеченности территории (как засухи с малой увлажненностью почвы, так и подтопления, наводнения, весенние паводки, характеризующиеся высокими значениями влажности почв).

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика дистанционного определения периодов фазового состояния внутренних водоёмов суши по ежедневным спутниковым измерениям яркостных температур подстилающей поверхности, позволяющая с точностью до суток детектировать смену состояний (открытая вода, ледообразование, ледостав, таяние) и формировать многолетние архивы данных.

2. Дистанционный микроволновый индекс гидрологической засухи, основанный на учёте яркостных температур водной поверхности, осушенного дна и почвенного покрова для оценки усыхания минерального озера, позволяющий выявить сезонную и многолетнюю динамику гидрологических процессов.

3. Дистанционный микроволновый индекс почвенной засухи, основанный на использовании спутниковых измерений яркостных температур и лабораторных измерений диэлектрических характеристик почвы, позволяющий оценить степень проявления почвенной засухи.

Достоверность полученных результатов подтверждается натурными измерениями исследуемых параметров, использованием лицензионных компьютерных программ, применявшихся для обработки спутниковых, наземных, лабораторных данных, полученных с помощью стандартных методик, корректностью постановки задач и их физической обоснованностью, проведением контрольных измерений, совпадающих с данными, полученными другими авторами, многочисленными публикациями в рецензируемых изданиях в России и за рубежом.

Личный вклад автора заключается в формулировании целей и задач исследований совместно с научным руководителем; разработке программной и аппаратной составляющих экспериментальных установок, анализе научных достижений по теме научной работы, проведении экспериментальных исследований с последующей обработкой результатов; обобщении полученных результатов; формулировании выводов по полученным результатам, подготовке публикаций в коллективе соавторов, апробации работы на всероссийских и международных конференциях.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались на 11 конференциях российского и международного уровней, в том числе: XIX–XXIII Международных конференциях «Современные проблемы дистанционного

зондирования Земли из космоса» (Москва), IX–XII Международных научных конференций «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск), IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», Международном степном форуме (X Международном симпозиуме «Степи Северной Евразии» (2024).

Публикации. По тематике диссертационного исследования опубликовано 16 публикаций, в т.ч. монография (в соавторстве), 8 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, в т.ч.: Water (Scopus); «Transactions on Geoscience and Remote Sensing» (WOS; Scopus), «Remote sensing» (WOS; Scopus), 5 статей в перечне ВАК, в т.ч.: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Scopus), «Известия вузов. Физика» (WOS, Scopus).

Объём и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 128 наименований. Общий объём работы составляет 93 страницы текста, в том числе 3 таблицы и 19 рисунков.

Результаты диссертационного исследования нашли отражение при выполнении государственного задания Проект FUFZ-2021-0007 «Природные и природно-хозяйственные системы Сибири в условиях современных вызовов: диагностика состояний, адаптивные возможности, потенциал экосистемных услуг», гранта РНФ № 22-17-20041 «Дистанционные радиофизические предвестники засух в стратегически важных аграрных регионах России (на примере Алтайского края)», гранта РНФ № 25-27-20020 «Разработка методов дистанционного мониторинга солончаков как индикаторов гидрологических изменений территории (на примере Алтайского края)».

Соответствие паспорту научной специальности 1.6.16. «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия» по направлению исследований: Опасные гидрологические явления–наводнения, маловодья, ледовые явления. Факторы и закономерности их проявления (п. 10); Математическое моделирование гидрологических процессов в речных бассейнах, руслах рек, водоемах суши. Использование геоинформационных систем и дистанционных методов в гидрологии (п. 12); Методы наблюдений, оценки и прогноза элементов водного баланса для водных объектов и их бассейнов. Исследования ресурсов поверхностных, почвенных и подземных вод (п. 13).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы.

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна исследования, выносимые на защиту положения, приводятся теоретическая и практическая значимость работы и апробация результатов.

Глава 1 носит обзорный характер. В **параграфе 1.1** приведена классификация опасных гидрологических явлений и процессов, связанных с изменением увлажнённости территорий, рассмотрены гидрологические и почвенные засухи, катастрофическое усыхание водоёмов.

В **параграфе 1.2 и 1.3** представлены методы дистанционного мониторинга водных объектов суши, и дистанционные индексы оценки гидрологических изменений. Рассмотрены современные технологии и подходы к дистанционному зондированию, включая использование спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов. Анализируются существующие индексы оценки гидрологических изменений, дистанционные индексы засухи и увлажнённости территорий, а также их применение в задачах мониторинга и прогнозирования.

Глава 1 завершается анализом существующих проблем и ограничений в изучении гидрологических явлений, подводя теоретическое обоснование необходимости разработки новых методов и индексов, основанных на радиофизических принципах дистанционного мониторинга.

В **Главе 2** изложена методика исследования и описаны используемые подходы, технологии и оборудование.

В **параграфе 2.1** представлены физико-географические характеристики основных объектов исследования, включающие крупные водоёмы Северной Евразии, такие как Каспийское море, Аральское море и Кулундинское озеро.

Описаны их природно-климатические особенности и наблюдаемые гидрологические изменения.

Для изучения гидрологических процессов и явлений, связанных с изменением

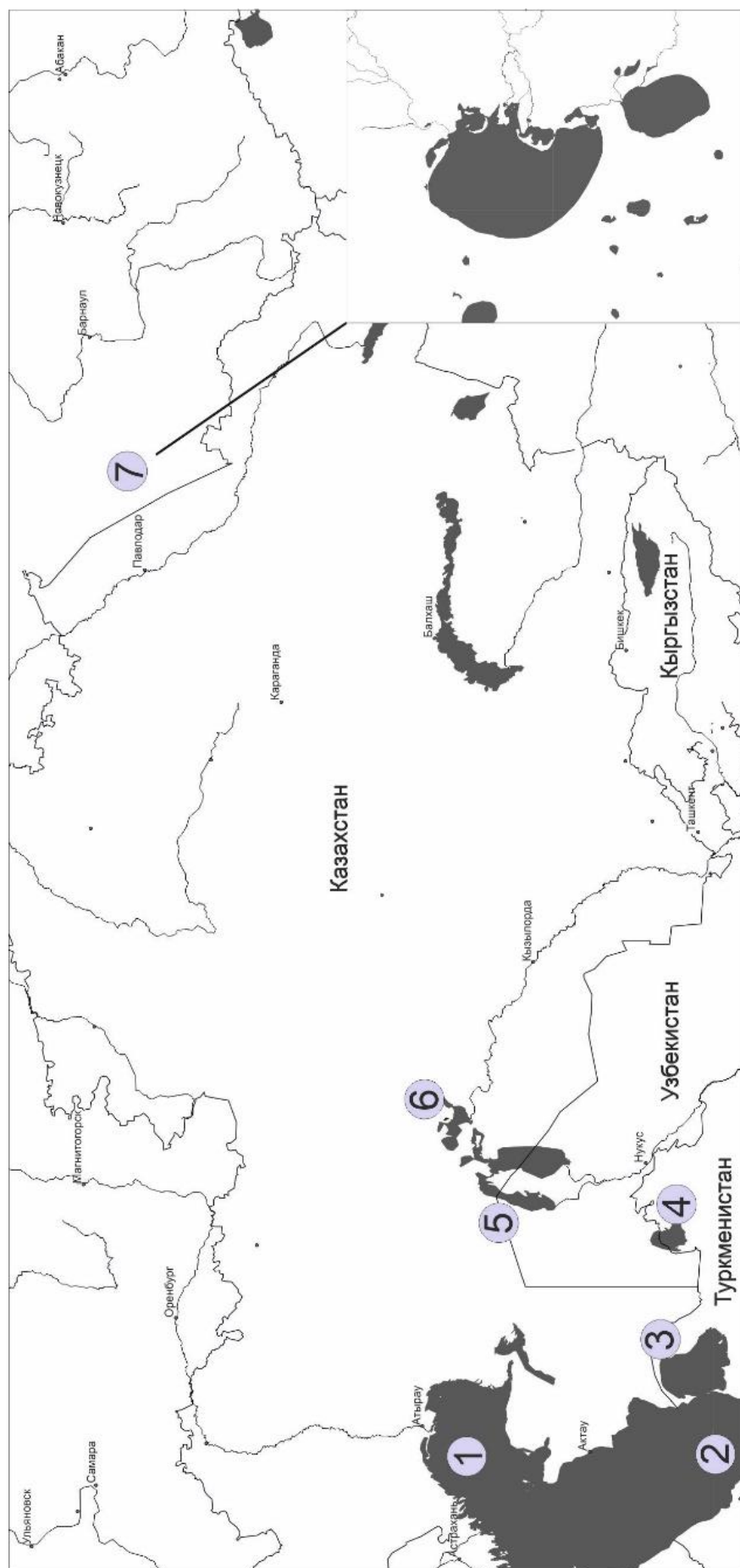


Рис. 1. Карта-схема расположения тестовых участков в Северной Евразии. 1, 2 – северная и южная части Каспийского моря; 3 – залив Кара-Богаз-Гол; 4 – Сарыкамышское озеро; 5, 6 – западная и северная части Аральского моря; 7 – оз. Кулундинское

увлажненности территорий, применён комплексный подход, заключающийся в исследовании сезонных и межгодовых вариаций физических характеристик разных типов подстилающей поверхности: почвы (незасоленные, засоленные, солончаки), водоемы и прилегающие к ним прибрежные территории с использованием следующих данных:

- 1) ежедневные спутниковые данные дециметрового, инфракрасного и оптического диапазонов (SMOS, MODIS, Sentinel-2);
- 2) данные автономных метеорологических станций (Агрометеостанция автоматическая АМК-02);
- 3) результаты непрерывных измерений температуры на тестовых участках, полученных с использованием автономных систем сбора информации;
- 4) результаты полевых исследований;
- 5) результаты лабораторных измерений физических и диэлектрических характеристик почв и воды, отобранных с тестовых участков.

В параграфе 2.2 и 2.3 подробно рассмотрены методы обработки спутниковых данных в видимом, инфракрасном, микроволновом диапазонах, соответственно. Особое внимание уделено алгоритмам обработки данных спутника SMOS и другим современным методам дистанционного зондирования, используемым для анализа гидрологических изменений.

Параграф 2.4 посвящён методикам полевых и лабораторных исследований. Приведено описание экспериментальных установок, применяемой аппаратуры для наземных наблюдений, а также подходов к измерению влажностных характеристик почвы и воды.

В главе 3 приведены основные научные результаты диссертации.

В параграфе 3.1 приведена подробная методика дистанционного определения периодов фазового состояния внутренних водоёмов суши по спутниковым измерениям яркостных температур, апробированная на примере внутренних водоёмов Северной Евразии. Данная методика позволяет оценить с точностью до суток детектировать смену состояний (открытая вода, ледообразование, ледостав, таяние) и формировать многолетние архивы данных (Callaghan et.al., 2026; Романов и др., 2023; Рябинин и др., 2023).

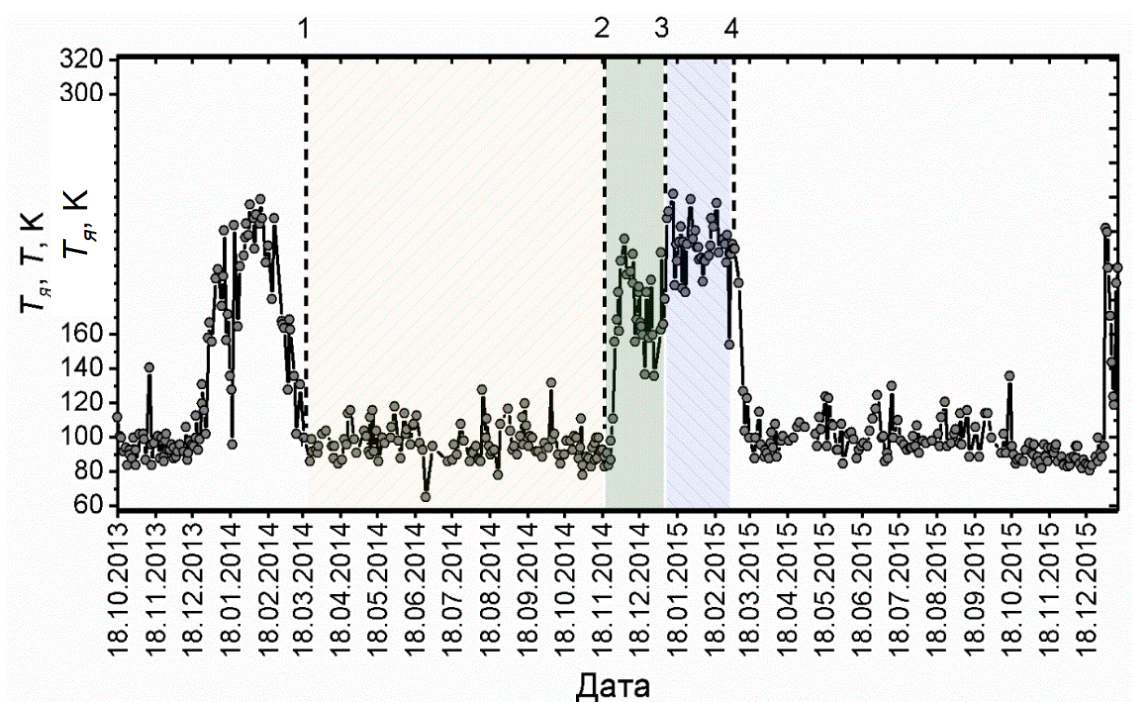


Рис. 2. Сезонная динамика яркостной температуры водной поверхности с наличием гидрологических фаз: 1-2 – открытая вода; 2-3 – образование ледяного покрова; 3-4 – ледяной покров; 4 – начало таяния ледяного покрова)

Приведены графики многолетней сезонной динамики яркостных температур ($T_{я}$) тестовых участков с 2012 по 2020 годы.

Особенностью микроволнового излучения различающихся участков (почвенный покров и водная поверхность) является существование следующих периодов с разными излучательными характеристиками:

1. Для почвенного покрова: 1) незамерзшая почва; 2) образование сезонно-мерзлого слоя; 3) мерзлая почва; 4) оттаивание сезонно-мерзлого слоя.
2. Для водной поверхности: 1) открытая вода; 2) образование ледяного покрова; 3) ледяной покров; 4) таяние ледяного покрова.

В параграфе 3.2 представлены результаты разработки и апробации дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи, основанного на учёте яркостных температур водной поверхности, осушенного дна и почвенного покрова для оценки усыхания минерального озера, позволяющего выявить сезонную и многолетнюю динамику гидрологических процессов. Разработанный индекс был протестирован на примере Кулундинского озера, характеризующегося значительными изменениями площади в результате чередующихся процессов усыхания и обводнения.

Рассмотрен процесс формирования яркостной температуры пикселя, который включает водную поверхность Кулундинского озера, прилегающую степь и осушенные участки дна. Приведены основные зависимости, связывающие яркостные температуры водной поверхности, осушенного дна и степи с изменением площади озера в результате процессов усыхания.

На основе этих зависимостей предложен дистанционный микроволновый индекс гидрологической засухи (G), определяемый как отношение площади осушенного дна (S_D) к первоначальной площади озера S_O^{max} .

$$G = \frac{S_D}{S_O^{max}} = \frac{T_{Я}^O - T_{Я}^B}{T_{Я}^D - T_{Я}^B},$$

где $T_{Я}^O, T_{Я}^B, T_{Я}^D$ – яркостные температуры озера, водной поверхности, осушенного дна.

Индекс гидрологической засухи позволяет количественно оценивать динамику усыхания озера и осуществлять дистанционный микроволновый мониторинг происходящих гидрологических изменений.

Рассматривается применение дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи, который может определяться как по данным микроволнового зондирования, так и по изображениям оптического диапазона (Sentinel-2, уровень L2A NDWI). Использование оптических данных может привести к погрешности из-за ошибочного распознавания переувлажнённого грунта как водной поверхности. Микроволновый диапазон, благодаря различию диэлектрических характеристик солёной воды и влажного грунта, позволяет избежать подобных ошибок.

Также исследовалась термодинамическая температура (T_D) осушенного дна озера по данным MODIS MxD11A1. Несмотря на низкое разрешение данных (1000 м), при значительном снижении уровня воды возможна достоверная оценка температуры крупных участков осушенного дна. Приведён анализ изменения температуры за период 2012–2023 годов, основанный на измерениях в утренние и вечерние часы, выявляющий закономерности сезонной и многолетней динамики.

Методика расчёта индекса гидрологической засухи показала эффективность его использования для мелководных степных озёр с динамичной сезонной площадью (рис. 3).

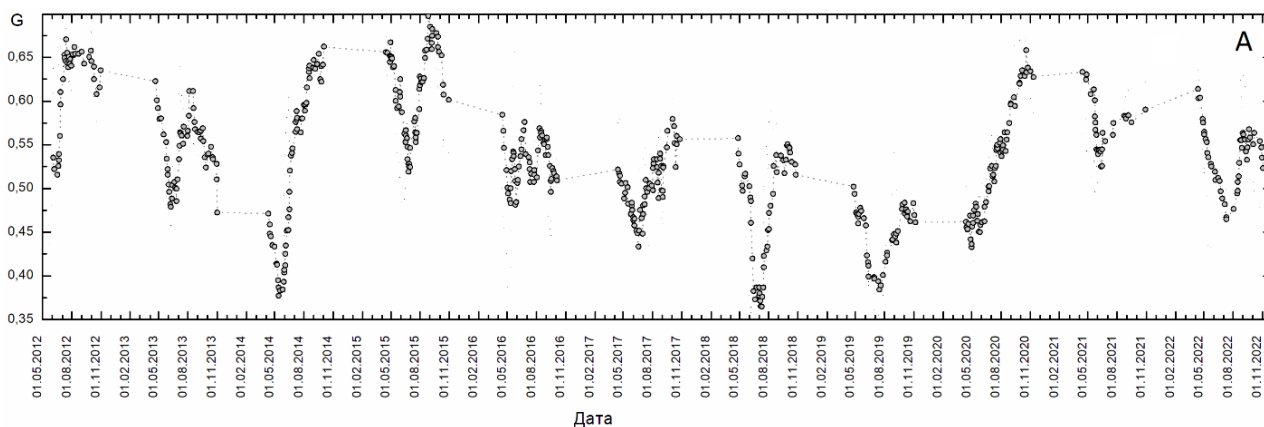


Рис. 3. Многолетняя динамика G (A) для Кулундинского озера

Согласно определению, G изменяется от 0 до 1. При $G = 0$ вся акватория озера покрыта водой. При $G = 1$ возникает ситуация, когда все озеро высохло. Полученные результаты показали, что предложенный индекс позволяет с высокой точностью оценивать динамику гидрологических изменений.

В параграфе 3.3 представлен дистанционный микроволновый индекс почвенной засухи, основанный на использовании спутниковых измерений яркостных температур и зависимостей коэффициентов излучения почвенного покрова от объёмной влажности, рассчитанных по данным измерений диэлектрических характеристиках почвы, протестированный на тестовых участках Кулундинской степи в Алтайском крае.

Для расчёта индекса почвенной засухи использовались данные спутника SMOS (частота 1,41 ГГц) и экспериментально установленные зависимости между диэлектрическими свойствами почвы и содержанием влаги. Исследуемая территория представляет собой плоскую равнину, покрытую низкорослой растительностью с незначительной биомассой. Почвы исследуемой территории представлены илистыми суглинками. В естественных условиях плотность (ρ), температура (t) и объёмная доля воды (W) в поверхностном слое почвы (0-5 см) изменялись в пределах $\rho = 1,06-1,35$ г/см³; $\rho_{\text{сух}} = 1,05-1,2$ г/см³; $W = 0,05-0,28$ см³/см³; $T = 18-60^{\circ}\text{C}$.

По данным многолетних агрогидрологических наблюдений зафиксирована слабая почвенная засуха при $W \leq 0,08$ см³/см³, и сильная засуха при $W \leq 0,055$ см³/см³. Влажность устойчивого увядания варьировала от 0,084 до 0,091 см³/см³ (при $\rho_{\text{влаж}} = 1,08-1,15$ и $\rho_{\text{сух}} = 1,0-1,07$ г/см³).

Были экспериментально установлены зависимости между диэлектрическими характеристиками и объёмной влажностью. Зависимости позволяют количественно оценивать влагосодержание почвы, на основе измеренных яркостных температур. Для исследуемой территории обобщенную зависимость $(n, \kappa)(W)$ (рис. 4) аппроксимировали прямыми линиями. Измерения n и κ проводили в диапазоне почвенной влажности $W = 0 - W_{\max} = 0,45 \text{ см}^3/\text{см}^3$. На графиках выделяются два интервала W с разным поведением n и κ : $0 - W_t$ и $W_t - W_{\max}$, где $W_t = 0,11 \text{ см}^3/\text{см}^3$ – содержание объемной доли влаги, соответствующее переходу из связанной воды в свободную. Диэлектрические свойства связанной и свободной воды заметно различаются.

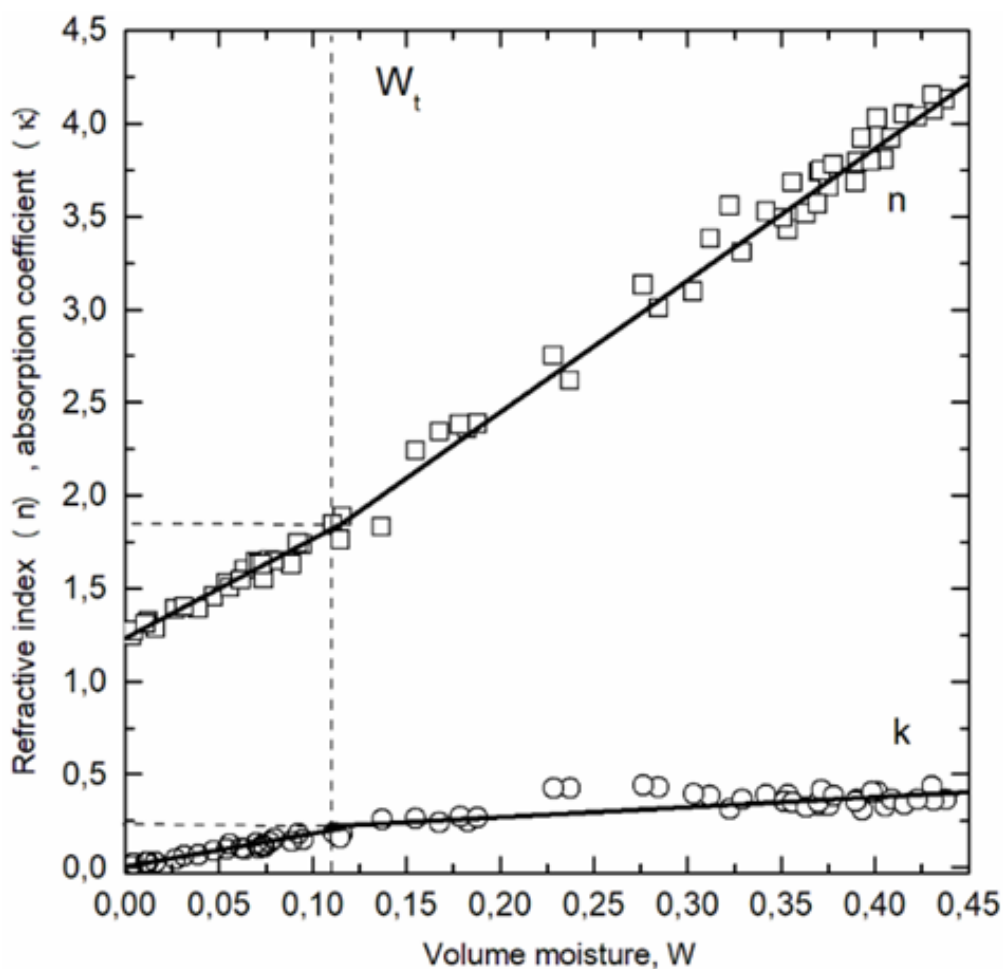


Рис. 4. Зависимости показателя преломления (n) и коэффициента поглощения (κ) от W
 $(\rho_{\text{dry}}=1,06 \text{ г/см}^3)$

Для оценки степени влажности почвы (включая засуху и переувлажнение) мы вводим дистанционный микроволновый индекс почвенной засухи *RMSDI* (*Remote*

Microwave Soil Drought Index) как отношение длин интервалов в разных диапазонах влажности

$$RMSDI = \begin{cases} \frac{\chi_t - \chi}{\chi_0 - \chi_t}, & \chi_t \leq \chi \leq \chi_0, \\ \frac{\chi_t - \chi}{\chi_t - \chi_w}, & \chi_w \leq \chi \leq \chi_t. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь χ_0, χ_t, χ_w – коэффициенты излучения сухой почвы, почвы с влажностью W_t и воды; χ – коэффициент излучения почвы, определяемый по данным спутникового зондирования в микроволновом диапазоне.

В таблице 1 приведены численные значения W и $RMSDI$, соответствующие градациям степени увлажнения территории, используемой для агрометеорологии. Зависимость $RMSDI(W)$ показана на рис. 5.

Таблица 1. Соответствие W и $RMSDI$ степени влажности, используемой в агрометеорологии.

N	$W, (\text{см}^3/\text{см}^3)$	$RMSDI$	Степень влажности
1	0.000 – 0.026	-1.000 – -0.776	Сильная почвенная засуха
2	0.026 – 0.047	-0.776 – -0.595	Слабая почвенная засуха
3	0.047 – 0.08	-0.595 – -0.310	Недостаточное увлажнение (сильное)
4	0.08 – 0.112	-0.310 – -0.034	Недостаточное увлажнение (слабое)
5	0.112 – 0.16	-0.034 – 0.132	Оптимальное увлажнение
6	0.160 – 0.340	0.132 – 0.670	Чрезмерная гидратация
7	>0.34	>0.67	Заболачивание

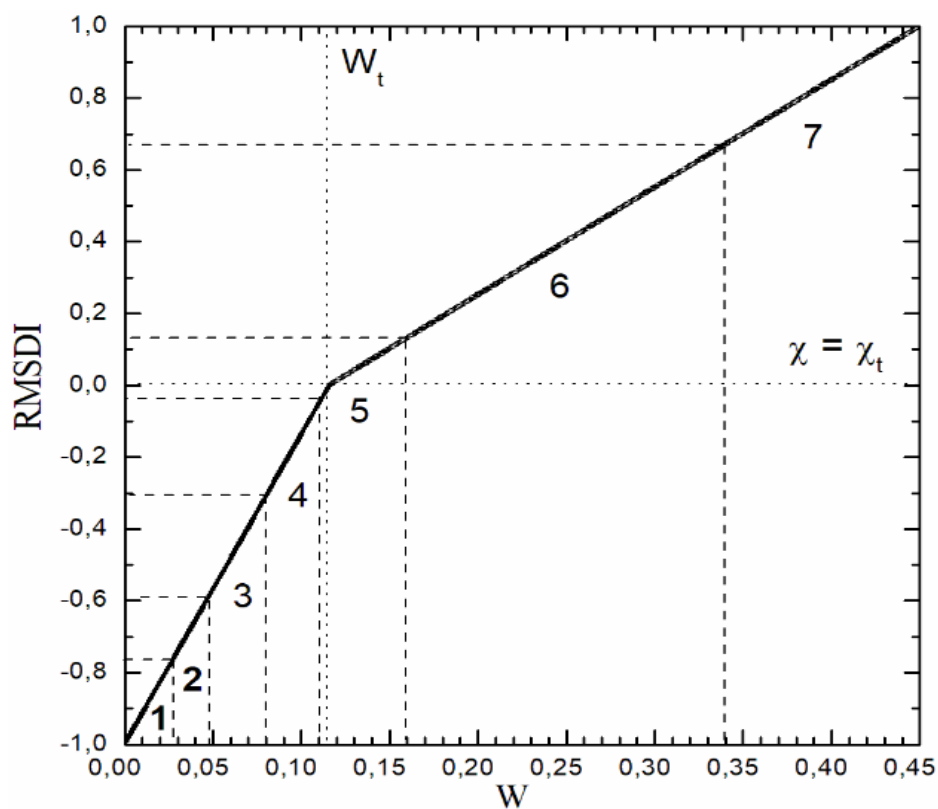


Рис. 5. Зависимость $RMSDI(W)$: 1-7 – степень влажности (табл. 1)

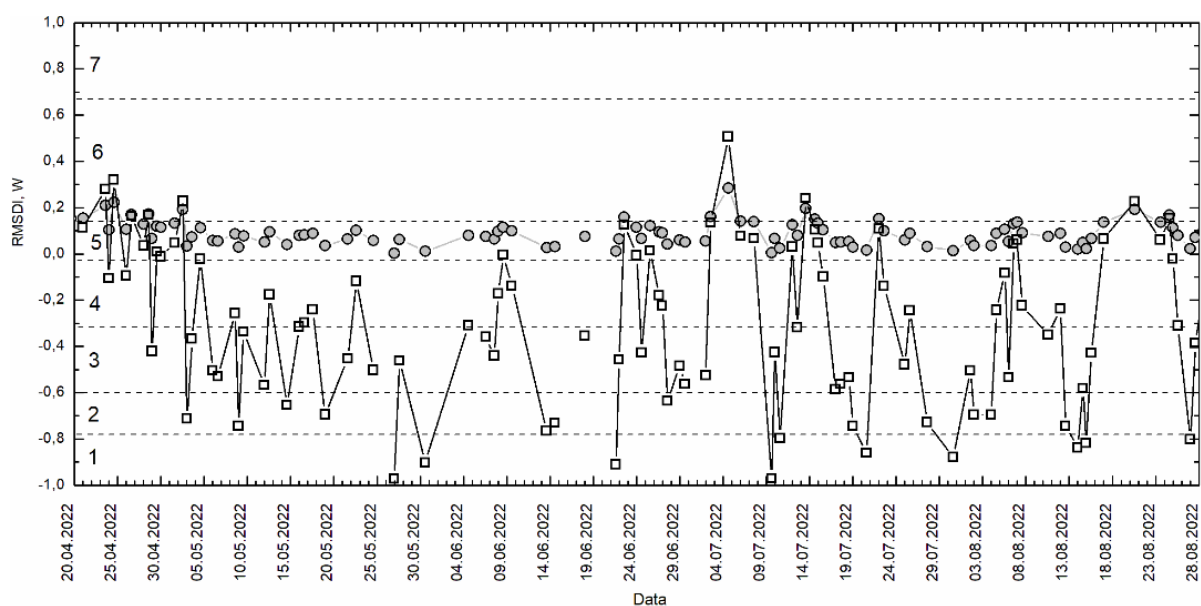


Рис. 6. Значения W и $RMSDI$, рассчитанные по спутниковым измерениям $T_{Я}$ (SMOS) и T (MODIS) по формуле (1)

По результатам спутниковых измерений $T_{Я}$, T и зависимостей $W(\chi)$ построены схематические карты пространственного распределения W и $RMSDI$ (для $W_t = 0,11$) (Рис. 7).

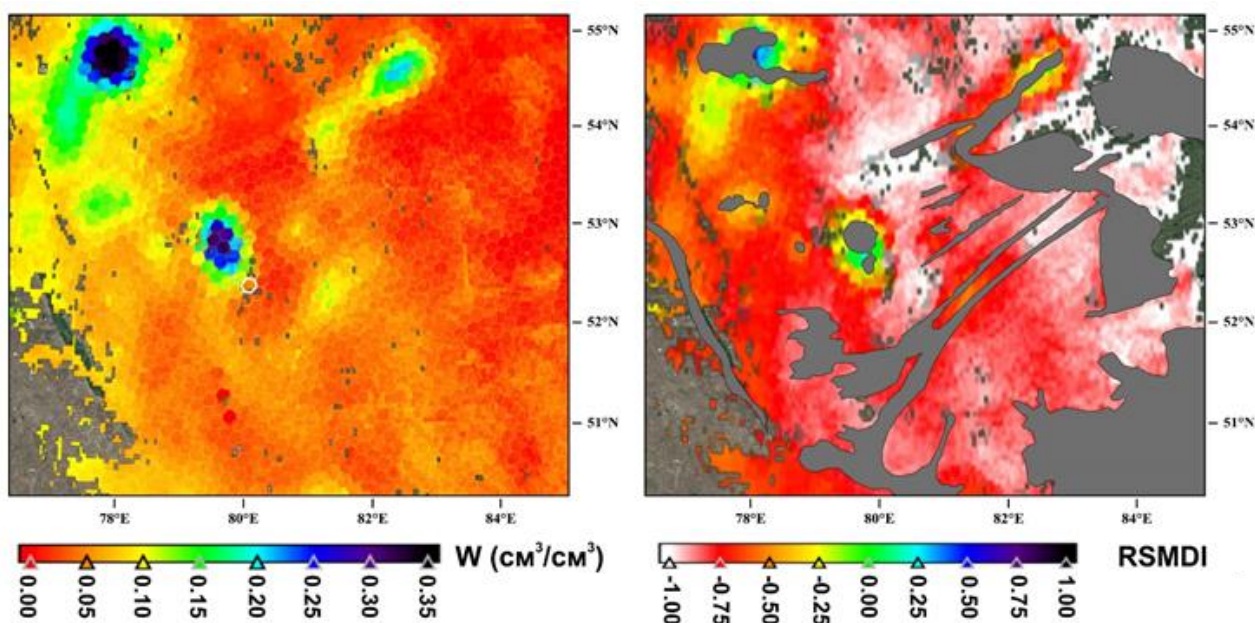


Рис. 7. Карты-схемы пространственного распределения объемной влажности (W) и дистанционного микроволнового индекса засухи ($RMSDI$) по состоянию на 26.07.2012

В **Заключении** представлены основные результаты исследования:

1. Совместный анализ спутниковых данных SMOS, MODIS позволил выявить сезонные вариации микроволнового излучения минеральных озер. Показано, что закономерности многолетней сезонной динамики яркостных температур минеральных озер в Северной Евразии существенно различаются. Для озер с сезонным ледовым покровом, образующимся на поверхности воды, на зависимостях $T_y(D)$ выделено четыре временных интервала, в каждом из которых яркостные характеристики водной поверхности различаются.
2. Предложены новые подходы для более эффективного дистанционного мониторинга оценки и прогнозирования засух. Оценены особенности проявления засух на тестовых территориях юга Западной Сибири и Центральной Азии.
3. Выявлены новые зависимости между почвенной засухой и сезонной динамикой радиоизлучательных характеристик подстилающей поверхности. Разработан и апробирован на территории Алтайского края дистанционный микроволновый индекс почвенной засухи.
4. Выявлены новые зависимости между гидрологической засухой (усыханием озер) и многолетней динамикой радиоизлучательных характеристик подстилающей поверхности. Разработан и апробирован на территории Алтайского края дистанционный индекс гидрологической засухи (индекс усыхания водоемов).

Дальнейшее развитие данной темы видится в проведении следующих исследований:

1. Для водоёмов: учет влияния солёности воды и типа растворённых солей на радиоизлучательные характеристики водной поверхности, оценка влияния сезонного ледяного покрова на микроволновое излучение, и др.
2. Для почвенного покрова: создание и накопление баз данных по диэлектрическим и радиоизлучательным характеристикам разных типов почв, в том числе засоленных, оценка влияния типа и гранулометрического состава почвы, оценка и уточнение экранирующего влияния растительности на микроволновое излучение увлажнённых почв.
3. Разработка и уточнение методов дистанционного мониторинга водных объектов с площадью, меньшей пикселя (разрешающей способности) антенных систем спутникового микроволнового радиометра.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК, в т. ч. индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science

1. Анализ гидрологических изменений минеральных озёр в Северной Евразии по данным спутника SMOS / А. Н. Романов, **И. В. Рябинин**, И. В. Хвостов, Д. А. Романов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19, № 6. – С. 222-233.
2. К разработке дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи (на примере сезонного усыхания гипергалинного озера) / А. Н. Романов, И. В. Хвостов, **И. В. Рябинин**, Д. А. Романов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 6. – С. 222-233.
3. Remote Microwave Soil Drought Index Considering Dielectric Properties of Soil / A. N. Romanov, I. V. Khvostov, **I. V. Ryabinin** (et al.) // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2023. – Vol. 61. – P. 4408208.
4. Analysis of Hydrological Changes in Mineral Lakes in Northern Eurasia Based on SMOS Satellite Data / A. N. Romanov, I. V. Khvostov, **I. V. Ryabinin**, D. A. Romanov // Cosmic Research. – 2023. – Vol. 61, No. S1. – P. S80-S88.
5. Дистанционные микроволновые индикаторы сухости леса / А. Н. Романов, И. В. Хвостов, **И. В. Рябинин** и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 1. – С. 197-209.
6. Дистанционная оценка влагозапаса почвы в метровом слое по данным спутника SMOS / А. Н. Романов, И. В. Хвостов, **И. В. Рябинин**, Д. А. Романов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 4. – С. 209-222.
7. Remote Radio-Physical Harbingers of Drought in Steppes of the South of Western Siberia / A. Romanov, **I. Ryabinin**, I. Khvostov (et al.) // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14. No. 23. – P. 6141.
8. Atmospheric and Hydrospheric Characteristics in Contrasting Arctic and Intracontinental Regions of Northern Eurasia and Possible Mutual Influences / T.V. Callaghan,

Монографии

9. Технологии дистанционного мониторинга засух / А. Н. Романов, Д. М. Ермаков, В. В. Тихонов, **И.В. Рябинин** и др. – Барнаул: Алтайский государственный университет, 2024. – 148 с. – ISBN 978-5-7904-2889-0.

Материалы научных конференций

10. Некоторые результаты дистанционного микроволнового мониторинга засух на юге Западной Сибири / **И. В. Рябинин**, Д. А. Романов, И. В. Хвостов и др. // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : Материалы IX Международной научной конференции, Красноярск, 13–16 сентября 2022 года / Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 33-36.
11. Оценка почвенной засухи на юге Западной Сибири по данным спутника SMOS / А. Н. Романов, **И. В. Рябинин**, И. В. Хвостов и др. // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 14–18 ноября 2022 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2022. – С. 330.
12. Рябинин, И. В. Оценка гидрологической засухи на юге Западной Сибири по данным спутника SMOS / **И. В. Рябинин**, И. В. Хвостов, А. Н. Романов // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 14–18 ноября 2022 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2022. – С. 331.
13. Романов, А. Н. К разработке дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи / А. Н. Романов, И. В. Хвостов, **И. В. Рябинин** // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 13–17 ноября 2023 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2023. – С. 44.
14. Дистанционные радиофизические предвестники засух в аграрном регионе России (на примере Алтайского края) / А. Н. Романов, Д. Н. Трошкин, И. В. Хвостов, **И.В. Рябинин** и др. // Степи Северной Евразии: Материалы X международного симпозиума (Международного степного форума), Оренбург, 27 мая – 02 июня 2024 года. – Оренбург: Институт степи УрО РАН Оренбургского федерального исследовательского центра УрО РАН, 2024. – С. 1105-1112.
15. К оценке влагозапаса почвы в метровом слое по данным дистанционного микроволнового зондирования / А. Н. Романов, И. В. Хвостов, **И. В. Рябинин**, Д. А. Романов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : Материалы XI Международной научной конференции, Красноярск, 10–13 сентября 2024 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2024. – С. 124-127.
16. Дистанционные микроволновые предвестники почвенной засухи / А. Н. Романов, И. В. Хвостов, **И. В. Рябинин**, Д. А. Романов // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 11–15 ноября 2024 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2024. – С. 203.

Издательская лицензия ЛР 020261 от 14.01.1997.

Подписано в печать 03.09.2026.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Усл.-печ. л. 1,16. Тираж 80. Заказ 424.

Типография Алтайского государственного университета:
656049, Барнаул, ул. Димитрова, 66