Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения
Российской академии наук

На правах рукописи

Рябинин Иван Валерьевич

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО МИКРОВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА ПОЧВЕННЫХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЗАСУХ

Специальность 1.6.16 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия
Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент А.Н. Романов

Барнаул – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ……..…….…….3

ГЛАВА 1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОЁМАХ СУШИ И НА ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ …….……..…….9

1.1 Классификация опасных гидрологических явлений и процессов ……..…..9

1.2 Методы дистанционного мониторинга водных объектов суши …….……11

1.3 Дистанционные индексы оценки гидрологических изменений …….….13

Выводы по главе 1…….….25

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАННАЯ АППАРАТУРА …….……...26

2.1 Физико-географическая характеристика объектов исследования ……..…26

2.2 Методы обработки спутниковых данных оптического и инфракрасного диапазонов …….……29

2.3 Методика обработки данных спутника SMOS …….…….33

2.4 Методика полевых и лабораторных исследований …….…….36

Выводы по главе 2…….…….44

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ……...……..45

3.1 Методика дистанционного определения периодов фазового состояния внутренних водоёмов суши……..…….……..45

3.2 Дистанционный индекс гидрологической засухи (индекс усыхания водоемов на примере Кулундинского озера) …….…..……55

3.3 Дистанционный микроволновый индекс почвенной засухи ……..…..……66

Выводы по главе 3…….…….76

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 77

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 79

ВВЕДЕНИЕ

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, Q1); «Transactions on Geoscience and Remote Sensing» (WOS, Q1, Scopus Q1), «Remote sensing» (WOS, Q1, Scopus Q1), (Белый список, уровень 1), 5 статей в перечне ВАК, в т.ч.: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Scopus, Белый список, уровень 2), «Известия вузов. Физика» (WOS, Scopus, Белый список, уровень 2).

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).

ГЛАВА 1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОЁМАХ СУШИ И НА ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ

1.1 Классификация опасных гидрологических явлений и процессов

Гидрологический процесс представляет собой обусловленное физическими, химическими, биохимическими и биологическими причинами и закономерностями изменение в пространстве и во времени гидрологического состояния водного объекта, или территориально единой системы водных объектов (Михайлов и др., 2007). Гидрологический процесс состоит из последовательно сменяющих друг друга стадий или гидрологических событий. Их совокупность за годовой цикл, последовательная и закономерная смена формируют гидрологический режим водного объекта, как внешнюю форму гидрологического процесса.

Гидрологическое явление – кратковременное изменение в пространстве и во времени гидрологических характеристик, представляет собой внешнюю форму одной из стадий гидрологического процесса, часть гидрологического режима (Михайлов и др., 2007).

При некоторых условиях природные процессы могут характеризоваться как неблагоприятные, опасные, разрушительные, катастрофические, стихийные и быть источником опасности. В последнее время дополнительно учитываются угроза и ущербы экологически ценным объектам и системам (Магрицкий, 2016).

К опасным гидрологическим процессам и явлениям (ОГП и ОГЯ) следует относить те гидрологические процессы и явления, которые представляют угрозу человеку, животным и растениям, могут оказать негативное и даже поражающее воздействие на элементы природной среды, материальные ценности, объекты социально-экономического комплекса,

отдельные отрасли и в целом хозяйственную деятельность на основании РД 52.04.563-2002 (URL: http://docs.cntd.ru/document/1200034751) и постановления Госстандарта России от 16 апреля 1998 г. № 122 ГОСТ 22.0.03-97. (URL: https://docs.cntd.ru/document/1200001518).

Возникновение гидрологических чрезвычайных ситуаций (ЧС) способствует изменению водного режима водоемов, в том числе: высокий и низкий уровни воды. В районах с тёплым климатом на водный режим рек основное влияние оказывают атмосферные осадки и испарение. В районах с холодным и умеренным климатом также существенную роль играют температуры воздуха (Акимов и др., 2009).

Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) выделяет ряд опасных природных явлений, связанных с аридизацией (засухой) и климатическими изменениями. Перечень и критерии опасных природных явлений, действующие на территории деятельности ФГБУ "Западно-Сибирское УГМС" (Новосибирская, Томская и Кемеровская области, Алтайский край и Республика Алтай) приведены в приказе ФГБУ "Западно-Сибирское УГМС" №116 от 02.06.2014г. (URL: http://www.meteo-nso.ru/).

К опасным гидрологическим явлениям отнесена гидрологическая засуха (ГЗ) (Владимиров, 2012), способная привести к деградации водоёмов суши, в том числе к повышению солёности, ухудшению качества воды, изменению ихтиофауны, зоо- и фитобентоса. В периоды ГЗ происходит снижение уровня воды в реках, усыхание озёр, уменьшение запасов грунтовых вод. В качестве классификационных признаков засух используются: продолжительность экстремальных значений температуры и влажности природных сред (воздух, почва), уровень и расход воды в водных объектах.

К основным факторам, способствующим развитию засух, относятся климатические особенности региона, характеристики водосборного бассейна, а также деятельность человека (Keller et al., 2023). Подробный анализ ГЗ в мире с 1980 по 2008 г. приведён в работе (Добровольский, 2015). В

исследованиях (Владимиров, 2012; Владимиров, Малышева, 2012; Ashok K. Mishra et al., 2010) систематизированы физико-географические и антропогенные факторы, способствующие возникновению и развитию ГЗ. Почвенные и гидрологические засухи могут привести к снижению уровня грунтовых и подземных вод. Снижение увлажненности территории увеличивает вероятность возникновения пыльных бурь и суховеев, наносящих значительный ущерб сельскому хозяйству и инфраструктуре.

При засухах увеличивается опасность природных лесных и степных пожаров, так как растительность становится сухой и более подверженной возгоранию. Соответственно, засушливая территория имеет более высокий риск возникновения лесных и степных пожаров. В целом, засухи усиливают уязвимость регионов к различным опасным природным явлениям, увеличивая риск их возникновения и последствий для человека и окружающей среды.

1.2 Методы дистанционного мониторинга водных объектов суши

В настоящее время на орбите Земли функционирует большая группировка специализированных спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с измерительной аппаратурой на борту, работающей в разных диапазонах электромагнитного спектра (Лаврова и др., 2016). Различные активные и пассивные сенсоры способны детектировать видимую, инфракрасную и микроволновую области электромагнитного спектра для мониторинга гидрологических изменений, позволяющих получать информацию о состоянии поверхностных и грунтовых вод на больших территориях. Эта информация может быть использована для прогнозирования опасных гидрологических явлений и принятия мер по их предотвращению или смягчению негативных последствий.

Космические аппараты Terra и Aqua являются частью комплексной программы NASA EOS (Earth Observing System), направленной на исследование Земли. Одним из ключевых инструментов спутников серии EOS

является спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Сенсор MODIS, установленный на спутниках Terra и Aqua, имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазонах, и позволяет производить регулярную съёмку одной территории с пространственным разрешением до 250 м. Продукты, полученные в результате анализа изображений MODIS, описывают особенности суши, океанов и атмосферы и могут быть использованы для изучения процессов и тенденций в локальном и глобальном масштабах (URL: https://modis.gsfc.nasa.gov/). В настоящее время MODIS заменяется прибором VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) (спутники серии Suomi NPP, JPSS). VIIRS обеспечивает преемственность данных для мониторинга атмосферы, суши, и Мирового океана.

Для дистанционного мониторинга водных объектов по космическим многоспектральным изображениям широко используются различные индексы. Также предоставляются вспомогательные данные для помощи в интерпретации наблюдений, полученных со спутника Landsat 8 и многоспектрального прибора (MSI) на борту спутника Sentinel-2A/B/C.

В последние 10-15 лет получили развитие дистанционные микроволновые методы мониторинга гидрологических изменений, основанные на использовании спутниковых данных сантиметрового и дециметрового диапазонов и ставшие возможными в результате запуска спутников, оснащенных радиометрическими системами (AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer), SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) SSMIS (Special Sensor Microwave Imager Sounder), MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) и др.

1.3 Дистанционные индексы оценки гидрологических изменений

В настоящее время дистанционный мониторинг гидрологических изменений основан на использовании многочисленных дистанционных и наземных индексов и их комплексировании. К настоящему времени разработаны и апробированы в разных регионах мира более 170 индексов засухи (Svoboda and Fuchs, 2016), но ни один из них не гарантирует точного прогноза масштабов, сроков, продолжительности, интенсивности засух, более того, уже многократно апробированные в разных регионах мира, индексы засухи дают сбои в условиях изменяющегося климата и возрастающего антропогенного воздействия на экосистемы. Таким образом, достоверное, высокоточное прогнозирование гидрологических изменений остается в настоящее время нерешённой научной проблемой.

В мировой практике индексы и показатели засухи делятся на следующие типы: 1) метеорологические индексы; 2) индексы, характеризующие почвенную влагу; 3) гидрологические индексы; 4) индексы дистанционного зондирования. Каждый используемый показатель рассматривает ситуацию с засушливыми условиями с определенной точки зрения и в зависимости от конкретной поставленной задачи. Отсюда следует, что возможности единого подхода к сравнению результатов на основе применения различных показателей ограничены. Соответственно, существует острая необходимость в разработке обобщенных индексов, более совершенных индикаторов и методов мониторинга почвенной и гидрологической засух (Черенкова, 2016; Yihdego, 2019), работающих в современных условиях непредсказуемости климатических изменений. По мере изменения климата или сезонного сдвига заранее определенные индикаторы засухи становятся бесполезными. Соответственно, в настоящее время значительная часть исследований в данной области связана с комбинированием разных индексов и разработкой обобщенного индекса для качественной и количественной оценки процессов засухи в разных регионах мира (Романов и др., 2024).

В работе (Щербенко, 2007) приведен обзор существующих методов дистанционного зондирования для обнаружения и мониторинга территорий, подвергшихся засухе. Наряду с традиционными методами, использующими только метеорологические параметры, рассмотрены комбинированные индексы, основанные на метеоданных и данных дистанционного зондирования, а также индексы, не использующие наземные данные. Особое внимание уделено индексам, основанным на комбинировании видимого, ближнего ИК и тепловых каналов спектра при съемках, как в дневное, так и в ночное время суток. Показаны преимущества использования отдельных индексов в разных регионах мира.

Надежной информацией о климатических экстремумах становится спутниковый мониторинг таких биофизических параметров и их аномалий, как влажность почвы (Soil Water Index, SWI), вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), альбедо и температура поверхности. В настоящее время эти параметры, за исключением влажности почвы, регулярно вычисляются с 2000 г. по данным спутниковых наблюдений радиометром MODIS. Для детектирования засух и переувлажнения после обильных осадков разработан и используется на практике спутниковый индекс климатических экстремумов (SCEI), представляющий собой сумму отклонений от многолетнего среднего индекса влажности почвы, NDVI, альбедо, температуры поверхности, нормированных на среднеквадратическое отклонение (Золотокрылин, 2012, 2018, 2022). Ведутся активные исследования по разработке индексов засухи и их апробации на разных территориях, различающихся по климатическим условиям (Илякова, 2011; Дунаева, 2019; Алиева, 2017; Задорнова, 2015; Страшная, 2015; Зверев, 2012; Черенкова, 2016; Литвинова, 2020; Рочева, 2012; Виноградова, 2015).

Оригинальный подход к исследованию засухи описан в статье (Wen, 2021), где одновременно с засухой рассматривается засоление почвы. Засуха и засоление почв считаются двумя основными факторами, ограничивающими урожайность сельскохозяйственных культур. Прогнозируется, что с

изменением климата эти стрессы будут усиливаться, и еще больше усугубят риски для глобальной продовольственной безопасности. Следовательно, необходим регулярный мониторинг засухи и засоления. Однако дистанционное зондирование еще не использовалось для одновременного мониторинга засухи и засоления.

При исследовании засушливых территорий, находящихся в условиях содового засоления почв, возникает необходимость различать влияние эффектов засухи и засоленности на рост сельскохозяйственной растительности. Это связано с тем, что разные индексы засухи показывают разную чувствительность к одним и тем же факторам, параметрам окружающей среды. Неучёт этого может привести к артефактам засухи и засоления (засоление кардинально изменяет зависимости яркостных характеристик почвенного покрова от влажности) (Mukherjee, 2018; Romanov, 2019).

В работе (Bingfang et al., 2020) предлагаются два оценочных индекса смягчения последствий засухи в сельском хозяйстве –ADFC (изменение частоты сельскохозяйственных засух) и ADAC (изменение площади сельскохозяйственных засушливых земель), которые рассчитываются путем объединения индекса суровости засухи Палмера (PDSI) и индекса здоровья растительности (VHI). Результаты показывают, что ADFC и ADAC могут отражать как пространственно-временные изменения характеристик сельскохозяйственной засухи, так и влияние мер по борьбе с засухой на сельскохозяйственную засуху. С другой стороны, следует отметить, что эти индексы могут быть оценены по данным микроволнового зондирования, в частности со спутника SMOS путем подсчета площадей почвенного покрова с разной влажностью (Romanov, Khvostov, 2015; Романов и др., 2023, 2024).

Наиболее хорошо отработаны методы оценки засух, основанные на результатах наземных наблюдений. В (Zhang, 2011) приведено описание наиболее широко используемых в последние годы индексов засухи: NMDI (нормализованный индекс засухи), индексы засухи VCADI; PDI, MPDI, SPDI,

SMDI (индекс дефицита влаги в почве), ETDI (Evapotranspiration Deficit Index); TVDI (температурный индекс засухи растительности), VTCI (индекс температурных условий растительности), WDI (индекс дефицита воды),; SVI (стандартный индекс растительности); CSMI (индекс влажности почвы возделываемых земель). Совокупный анализ этих индексов позволяет выбрать подходящий индекс засухи для конкретного региона.

Для анализа состояния водоёма в условиях засухи используются: гидрологический индекс засухи Палмера, модифицированный для учёта продолжительной засухи, влияющей на речной сток и подземные воды; стандартизированный индекс запаса водоёма, изменяющийся в диапазоне от –3 (экстремально сухо) до +3 (экстремально влажно); стандартизированный индекс речного стока, определяемый для заданного периода времени как разница в речном стоке от среднего до стандартного отклонения; стандартизированный индекс стока (Рахмуни и др., 2022).

В (Hao and AghaKouchak, 2013) разработан многомерный стандартизованный индекс засухи (MSDI), объединяющий стандартизованный индекс осадков (SPI) и стандартизованный индекс влажности почвы (SSI) для характеристики засухи. MSDI включает метеорологические и сельскохозяйственные засушливые условия для общей характеристики засухи (апробирован в условиях засухи в Калифорнии и Северной Каролине). В (Yilmaz, 2018) для анализа засухи предложено использовать модифицированный разведывательный индекс засухи (mRDI), учитывающий как кумулятивные осадки, так и потенциальную эвапотранспирацию. Индекс mRDI позволяет оценить как текущие, так и исторические засухи в единой метрике. Он предоставляет дополнительную информацию для исследований, посвященных социально-экономическим и экологическим проблемам засух, может использоваться в качестве эффективного индикатора в вопросах управления водными ресурсами и сельскохозяйственного страхования.

В (Yang et al., 2017) разработан нелинейный многомерный индекс засухи (NMDI), построенный путем объединения метеорологических, гидрологических и сельскохозяйственных переменных (осадки, сток и влажность почвы). На основе построенного NMDI могут быть оценены три характеристики засухи: продолжительность, пик, интенсивность. В (Chattopadhyay et al., 2020) разработан комбинированный индекс засухи (CDI) с использованием метеорологических, наземных и дистанционных наблюдений. CDI дает синтетический и синоптический обзор ситуаций засухи с использованием схемы классификации, полученной на основе различных индивидуальных индексов.

Спутниковые индексы засухи доказали свою эффективность и удобство для определения условий засухи в региональном и глобальном масштабах. Однако большинство текущих индексов засухи основаны на данных дистанционного зондирования в видимой / ближней инфракрасной области, подверженных сильному влиянию облачности, содержанию водяного пара в атмосфере и дождевым осадкам. Микроволновые датчики лишены этих недостатков, являются всепогодными. Но на сегодняшний день применение микроволновых индексов засухи растительности в мониторинге засухи детально не изучено.

В ряде работ (Wei et al., 2021; Li Z. et al, 2020) для оценки индексов засухи, полученных с помощью дистанционного зондирования, в разных регионах использовался набор различных индексов засухи: PDSI), SPI, индексы одиночной засухи, состояния растительности, температурных условий (TCI) (MODIS), условий осадков, состояния почвенной влаги (SMCI) (AMSR-E), а также комбинированные индексы засухи, включая Интегрированный микроволновый индекс засухи (MIDI). Оптимизированный индекс засухи растительности (OVDI), Оптимизированный метеорологический индекс засухи (OMDI), Масштабный индекс засушливых условий (SDCI) и Синтезированный индекс засухи (SDI) были проанализированы и сопоставлены для оценки их применимости. Результаты показали, что разные

индексы засухи имеют специфические характеристики при разных типах землепользования (на примере Китая).

В (Wang et al., 2020) для мониторинга засухи разработан улучшенный индекс температуры-растительности-влажности почвы (iTVMDI), основанный на данных дистанционного зондирования в оптическом, инфракрасном и микроволновом диапазонах. Результаты мониторинга подтверждены метеорологическими данными. Результаты показали, что iTVMDI имеет отрицательную корреляцию с осадками (R = - 0,73), а средний коэффициент корреляции с температурой составляет 0,76. В целом, iTVMDI можно применять для мониторинга временных и пространственных изменений условий засухи. В обзорной статье (AghaKouchak et al., 2015) рассмотрены существующие и новые подходы к мониторингу засухи с использованием спутниковых наблюдений с климатологической и экосистемной точек зрения. Исследование выявляет серьезный пробел в показателях для описания воздействия засухи на углеродный и азотный циклы, которые имеют основополагающее значение для оценки воздействия засухи на экосистемы. В настоящее время не ведутся спутниковые наблюдения за относительной влажностью приповерхностного воздуха, позволяющие улучшить раннюю диагностику засухи.

В (Gerhards, et al., 2019) сделан обзор дистанционных спутниковых сенсоров и разработанных индексов засухи, получаемых на основе данных с этих сенсоров. Используются видимый и инфракрасный диапазоны (мультиспектральное и гиперспектральное зондирование) для обнаружения водного стресса сельскохозяйственных культур.

В (Gerhards, et al., 2019) предложен инновационный индикатор засухи с более широким пространственным и временным охватом, основанный на использовании данных яркостной температуры, измеренных со спутника SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) как показатель засухи, так называемый стандартизованный индекс яркостной температуры (STBI). На примере засухи в Северных странах в 2018 году было обнаружено, что STBI обеспечивает

улучшенное пространственное и временное покрытие по сравнению с другими индексами засухи.

В (Quemada et al., 2021) рассмотрены различные методы дистанционного зондирования, описанные в литературе для мониторинга состояния воды в растениях. Пятью наиболее часто используемыми индикаторами объемной доли воды в растении являются нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) (12,2%), коэффициенты обратного рассеяния (10,8%), спектральная отражательная способность (8,1%), коэффициент отражения (8,1%) и диэлектрическая проницаемость (8,1%). В [90] рассмотрены принципы, разработки и применения различных спектральных индексов отражения (WI) для определения жидкой воды (WI) в почве и растениях.

В (Ma Shengfang et al., 2016) исследованы возможности мультисенсорного дистанционного зондирования для изучения ключевых явлений и механизмов, связанных с засухой, включая реакцию растительности на засуху, обратную связь между атмосферой и сушей во время засухи, вызванную засухой гибель деревьев, связанные с засухой пожары в экосистемах, восстановление после засухи, унаследованные эффекты, внезапная засуха, а также тенденции засухи в условиях изменения климата. Сделан вывод о том, что использование мультисенсорного дистанционного зондирования обеспечивает уникальные преимущества для региональных и глобальных исследований засухи, в частности: 1) выявление сложных механизмов воздействия засухи на компоненты экосистемы; 2) предоставление непрерывной долгосрочной информации, связанной с засухой, в региональном и глобальном масштабах; 3) представление информации о засухе в реальном времени с высоким пространственно-временным разрешением; 4) предоставление доказательств мониторинга засухи для повышения надежности моделирования и прогнозов; и 5) повышение точности мониторинга и оценки засухи. Особо подчеркивается, что необходимы дополнительные исследования засухи, ориентированные на механизмы, использующие комбинацию датчиков и методов (оптических,

микроволновых, гиперспектральных, лидарных) в различных пространственно-временных масштабах.

В (Jiao et al., 2019) показано, что оптическая глубина растительности (VOD), полученная с помощью микроволновой радиометрии, коррелирует с общим количеством воды в растительности. Эта корреляция дополнительно предполагает возможную связь между VOD и водным потенциалом древесной растительности. Соответственно, данные микроволнового зондирования могут быть использованы для оценки экологического состояния растительности. В (Rao, 2019) сделан прогноз, что случаи гибели деревьев, вызванной засухой, в будущем возрастут в связи с изменением климата. Выдвинута гипотеза о том, что относительное содержание воды (RWC), оцененное с помощью пассивного микроволнового дистанционного зондирования через оптическую глубину растительности, может использоваться в качестве эмпирического индикатора смертности деревьев, который объединяет вариации стресса растений от засухи и доступен на больших территориях.

В (Zhang et al., 2019) изучен комплексный микроволновый индекс засухи (MIDI), мультисенсорный микроволновый индекс засухи с дистанционным зондированием, объединяющий самые современные данные об осадках, полученные с помощью микроволнового излучения, влажности и температуры почвы. В (Le et al., 2019) анализируется потенциал использования нескольких инструментов дистанционного зондирования для количественной оценки и предсказания засухи в Северо-Западной Африке. Рассматриваются три дополнительных продукта: Нормализованный индекс разницы растительности (NDVI), индекс влажности почвы (SWI) и температура поверхности земли (LST). Метод не является прогнозом, он дает четкое указание на вероятную будущую траекторию данного гидрологического сезона. В (Liu et al., 2017) описан индекс температуры растительности и засухи (TVDI) - MTVDI на основе оптического TVDI с использованием яркостных температур (Тя), измеренных AMSR-E (спутник Aqua) на частотах 18,7 ГГц,

23,8 ГГц и 89,0 ГГц. Разработан микроволновый нормированный разностный индекс растительности (MNDVI) (AMSR-E).

В (Zhang et al., 2017) использовали явления засухи в 2011 и 2012 годах для сравнения различных индексов, разработанных для изучения явлений засухи. Индексы засухи, сравниваемые в этом исследовании, включают индекс состояния растительности (VCI), индекс температурных условий (TCI), индекс засухи (PDI) и модифицированный PDI (MPDI), полученные на основе данных MODIS, индекс состояния осадков (PCI) (на основе данных миссии по измерению тропических осадков (TRMM- Tropical Rainfall Measuring Mission), и индекс состояния влажности почвы (SMCI), полученный на основе AMSR-E. В этом исследовании также сравнивались синтезированные индексы засухи, объединяющие индексы VCI, TCI, SMCI и PCI. К ним относятся индекс здоровья растительности (VHI), температурный индекс засушливости растительности (TVDI), масштабированный индекс засушливых условий (SDCI), интегрированный микроволновый индекс засухи (MIDI), синтезированный индекс засухи (SDI), оптимизированный метеорологический индекс засухи (OMDI) и оптимизированный индекс засухи растительности (OVDI). Результаты показывают, что разные индексы имеют сильные и слабые стороны в разных климатических условиях.

В (Tian et al., 2017) разработан новый индекс, называемый индексом температуры осадков (PTI), основанный на пассивном микроволновом дистанционном зондировании TRMM и MODIS. Индекс может использоваться для мониторинга как засух, так и наводнений в течение десятидневного периода, а также для определения пространственных вариаций возникновения засух и наводнений в масштабе региона. Значение PTI составляет от 0 до 1. Чем ниже значение PTI, тем сильнее засуха, а чем выше значение PTI, тем сильнее паводок. Влажность почвы, измеренную с помощью ASMR-E, использовали для определения линии засухи PTI. Объемная влажность менее 15% соответствует засухе. Если PTI < 0,34, считается, что в этой зоне произошли бедствия, связанные с засухой, при

PTI > 0,55, считается, что в этой зоне происходят наводнения. Результаты показали, что PTI лучше справляется с мониторингом засух и наводнений.

В (Wuyungaowa et al., 2014) для мониторинга краткосрочной засухи в лиге Ксилингол (Внутренняя Монголия) использовали новый тип индекса засухи «интегрированный микроволновый индекс засухи», рассчитываемый по данным TRMM, данным о влажности почвы и температуре поверхности, полученных с помощью спутниковой системы наблюдения Земли Aqua EOS/PM-1. В (Романов и др., 2024) исследованы дистанционные радиофизические предвестники засух, основанные на использовании ежедневных спутниковых данных SMOS и апробированные на территории Алтайского края.

Гидрологическая засуха (ГЗ) представляет собой опасное природное явление, способное привести к деградации водоемов суши, в том числе, к повышению солености, ухудшению качества воды, изменению ихтиофауны, зоо- и фитобентоса. В периоды ГЗ происходит снижение уровней воды в реках, усыхание озер, уменьшение запасов грунтовых вод. В качестве классификационных признаков засух используются продолжительности экстремальных значений температуры и влажности природных сред (воздух, почва), уровни и расходы воды в водных объектах.

К основным факторам, способствующим развитию засух, относятся климатические особенности региона, характеристики водосборного бассейна, а также деятельность человека. Подробный анализ ГЗ в мире с 1980 по 2008 годы приведен в (Добровольский, 2015). В (Владимиров, 2012; Владимиров и Малышева, 2012) систематизированы физико-географические и антропогенные факторы, создающие ГЗ.

Для анализа состояния водоема в условиях засухи используются: гидрологический индекс засухи Палмера, модифицированный для учета продолжительной засухи, влияющей на речной сток и подземные воды; стандартизированный индекс запаса водоема, изменяющийся в диапазоне от −3 (минус 3)

(экстремально сухо) до +3 (экстремально влажно); стандартизированный индекс речного стока, определяемый для заданного периода времени как разница в речном стоке от среднего до стандартного отклонения; стандартизированный индекс стока (Рахмуни, 2022). При дистанционном мониторинге ГЗ также используются различные дистанционные индексы засухи, в том числе стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации, позволяющий выявлять явления засушливости и увлажнения; мелиоративный индекс засушливости, разработанный для определения интенсивности и продолжительности засух; индекс запаса поверхностной влаги (Svoboda and Fuchs, 2016).

Прогнозирование опасных гидрологических явлений эффективно с применением спутниковых снимков MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Ниязов и Калашникова, 2018). Дистанционные исследования гидрологических процессов включают оценку состояния поверхностных вод, водно-болотных угодий, использование воды в экосистемах, изменение облачности, водяного пара, осадков, испарения, транспирации, появление снега. В (Lai et al., 2019) описан новый подход к дистанционному мониторингу гидрологической засухи, основанный на использовании долгосрочных спутниковых данных об осадках и стандартизированного индекса речного стока.

В (Zhang et al., 2022) для оценки ГЗ разработаны дистанционные интегрированные индексы засухи (множественный индекс засухи, множественный индекс засухи, интегрированный индекс множественной засухи на основе индекса условий осадков, индекса температурных условий, индекса состояния растительности и индекса состояния влажности почвы.

В засушливых и полузасушливых регионах в периоды ГЗ одной из проблем является снижение уровня воды (УВ) в крупных озерах (Романов и др., 2024). Для оценки интенсивности, повторяемости и пространственно-временного распределения ГЗ в бассейне озера использовались аномалии нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), месячные значения влажности почвы, эвапотранспирации, временные ряды температуры подсти-

лающей поверхности и осадков. Основной причиной ГЗ в бассейне озера являются температурные аномалии и антропогенное воздействие. В (Романов и др., 2023) предложен дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи, апробированный на примере Кулундинского озера.

Выводы по главе 1

На основе проведенного анализа состояния исследований по данной теме и сделанного обзора литературы выявлена малоисследованная, но при этом весьма перспективная научная тема – разработка индикаторов влагообеспеченности территории на основе ежедневных данных спутникового микроволнового зондирования в дециметровом диапазоне длин волн (спутники SMOS, SMAP) для оценки, как засух, так и наводнений. Установлено, что традиционные методы наземного мониторинга не обеспечивают необходимую пространственную целостность данных, что критично для оперативного анализа засух на обширных территориях юга Западной Сибири и Центральной Азии.

Обоснованы преимущества использования радиометрических данных дециметрового диапазона (L-диапазон, спутники SMOS, SMAP). В отличие от методов оптического и ИК-диапазонов, микроволновое зондирование позволяет получать прямую информацию о влагосодержании почв и состоянии водных объектов независимо от облачности и освещенности. Рассмотрены современные дистанционные индексы (NDVI, NDWI, TVDI и др.). Сделан вывод о необходимости разработки специализированных радиофизических индикаторов, напрямую связывающих динамику яркостной температуры с динамикой излучательных характеристик подстилающей поверхности.

Основные теоретические положения и результаты анализа состояния проблемы, представленные в главе, отражены в публикациях автора, приведённых в списке литературы. Теоретические аспекты мониторинга засух изложены в монографии (Романов и др., 2024). Анализ гидрологических изменений и обзор возможностей спутника SMOS представлены в работах (Романов и др., 2023; Рябинин, 2023). Методологические подходы к анализу данных мониторинга обсуждались в материалах конференций (Романов и др., 2023; Рябинин, 2023).

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАННАЯ АППАРАТУРА

Для изучения гидрологических процессов и явлений, связанных с изменением увлажненности территорий, применён комплексный подход, заключающийся в одновременном 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.

2.1 Физико-географическая характеристика объектов исследования

В качестве основных объектов исследования были выбраны крупные водные объекты суши с прилегающими к ним территориями, в том числе:

1. Каспийское море и залив Кара-Богаз-Гол с изменяющимся уровнем воды.

Каспийское море — крупнейшее на Земном шаре озеро, уровень которого лежит ниже уровня Мирового океана. Площадь водосборного

бассейна составляет 3,5 млн км^2. Максимальная ширина — 435 км, средняя ширина — 310 км. Площадь акватории моря при отметке уровня –27,5 м в балтийской системе (БС) составляет 386,4 тыс. км^2. Средняя глубина моря равна 208 м, а максимальная — 1025 м (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1996; Зонн и др., 2015; Kostianoy, Kosarev, 2005).

На восточном берегу выделяется залив Кара-Богаз-Гол - мелководное понижение в рельефе, с плоским дном и непостоянной береговой линией. Морфометрические характеристики Кара-Богаз-Гола существенно изменяются в зависимости от положения уровня моря и залива. Физико-географические условия Кара-Богаз-Гола, его природный режим, зависящий от уровня Каспия и стока в залив, испытывают межгодовые изменения. (Гидрометеорология, 1992).

2. Аральское море в результате катастрофического усыхания, распавшееся на несколько водоёмов с образованием песчано-солончаковой пустыни.

Одна из физико-географических особенностей Аральского моря — изменение его морфометрических характеристик, связанное с непостоянством объема воды в нем, соответственно различным высотным положением уровня воды и разными размерами площади водной поверхности моря. Площадь Аральского моря сократилась в течение прошлого столетия, с 68 тыс. км^2 в 1960-х годах до менее чем 10 тыс. км^2 в 2015 году (Singh et al., 2018).

В результате многолетнего усыхания Аральское море распалось на два отдельных водоема: Северный Арал (North Aral sea – NAS) и Южный Арал (South Aral sea – SAS), который впоследствии распался на западную (глубоководную) и восточную части SAS. В результате особенно сильного высыхания в 2009 и 2014 восточная часть SAS почти полностью высохла в течение нескольких месяцев, оставив после себя обнаженное дно. В результате катастрофического высыхания озера участились пыльные бури, произошла деградация растительных сообществ, что привело к дальнейшему

опустыниванию территорий и значительному ухудшению экологической ситуации не только в Центральной Азии, но и в соседних регионах. В южной части SAS на месте оголившегося дна образовалась песчано-солончаковая пустыня Аралкум (Breckle et al., 2011). С начала 21 века площади западного и восточного бассейнов озера уменьшались со скоростями 191,73 км^2/год и 1089,48 км^2/год, соответственно, а площадь северного бассейна увеличивалась со скоростью 38,18 км^2/год (A. Massakbayeva, et al., 2020, Ayzel et al., 2019, Sun et al., 2019). Усыхание SAS сопровождалось повышением солёности воды (Makkaveev et al., 2018). В результате высыхания SAS образовалось большое количество солёной пыли, атмосферный (ветровой) перенос которой в другие регионы спровоцировал серьезную экологическую угрозу окружающей среде и здоровью человека (Zhou et al., 2019, Issanova et al., 2015, Indoitu et al., 2015, Löw et al., 2013). Дно бывшего моря представляет собой плоскую равнину, покрытую слоем соли и песка. В результате обмеления образовались новые формы рельефа, такие как солончаки, барханы и такыры.

3. Кулундинское озеро, испытывающая значительные изменения площади в результате периодических процессов усыхания/обводнения.

Кулундинское озеро является одним из крупнейших горько-соленых озер на юге Западной Сибири и крупнейшим в Алтайском крае. Площадь Кулундинского озера течение летнего сезона может изменяться на 25 % (в зависимости от погодных условий и водности года). Соответственно с изменением площади озера также изменяется солёность воды (Галахов, 2003).

Озеро расположено на северо-востоке Кулундинской равнины в 64 км от г. Славгорода, занимает самый пониженный участок Центрально-Кулундинской впадины. Озеро неглубокое, в среднем 2,5–3 м, максимальная глубина 5 м. Основным источником воды являются атмосферные осадки, реки Кулунда, Суетка и ручьи, впадающие в озеро. Также питание происходит за счёт грунтовых вод. Уровень солёности варьирует от 40 до 123 г/дм^3, в периоды усыхания концентрация солей увеличивается (Лукерина, 2024).

Почвы в окрестностях озера преимущественно солончаковые и солонцы, что связано с высокой минерализацией воды.

4. *Крупные озера Северной Евразии, расположенные в разных природно-климатических зонах.*

Сарыкамыш – бессточное горько-солёное озеро, расположенное на территории Туранской низменности, севернее пустыни Каракумы. Площадь озера Сарыкамыш и солёность воды в нём в настоящее время непостоянны и зависят от поступления в озеро коллекторно-дренажных вод. В 1985 году площадь поверхности составляла 3200 км², а в 2017 году – около 3000 км². Глубина озера достигает 40 метров.

2.2 Методы обработки спутниковых данных оптического и инфракрасного диапазонов

Данные Sentinel

На многоспектральных спутниковых изображениях оптического диапазона из-за наличия высокого контраста между спектральными каналами можно выделить значительное количество градаций, по которым определяются различные параметры подстилающей поверхности (в частности обмеление водного объекта, опознание границ «лед-вода», сплоченность общая и частная, каналы и крупные разводья, и ряд других характеристик). Использование спутниковых данных видимого и ближнего инфракрасного диапазонов высокого пространственного разрешения при благоприятных погодных условиях и хорошей освещенности позволяет получать высокодетальную информацию. Однако, применение спутниковых изображений видимого и ближнего инфракрасного диапазонов имеет существенные ограничения из-за влияния освещённости и облачного покрова. (Максимов, 2022).

Для дистанционного мониторинга водных объектов суши были использованы данные со спутника Sentinel-2 L2A. Продукт L2A применяет атмосферную коррекцию (процессор Sen2Cor) к входным данным Sentinel-2 L1C с глобальным покрытием. Многоспектральный формирователь изображений спутника обеспечивает универсальный набор из 13 спектральных диапазонов, охватывающих видимый и ближний инфракрасный диапазон (URL: https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinel-2).

Для мониторинга изменений, связанных с содержанием воды в водоёмах, использовался индекс NDWI. Поскольку водоёмы сильно поглощают свет в видимом и инфракрасном электромагнитном спектре, NDWI использует зеленый и ближний инфракрасный диапазоны для выделения водоемов (каналы B03 и B08).

Формула расчета: Sentinel-2 NDWI = (B03 - B08) / (B03 + B08)

(URL: https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndwi/).

С помощью специализированного программного обеспечения (например, QGIS, ArcGIS) рассчитывается индекс NDWI для каждого пикселя снимка. Для выделения водных объектов устанавливается пороговое значение NDWI. Выбор порогового значения NDWI критически важен для точного выделения водных объектов, поскольку теоретически обоснованный порог, равный 0, в реальных условиях эксплуатации часто приводит к систематическим ошибкам классификации. В ходе выполнения работы было установлено, что на исследуемых территориях фактический спектральный образ водных объектов подвержен сильной пространственно-временной изменчивости. Для мелководных или сильно минерализованных озер характерно повышенное обратное рассеяние в зеленой области спектра за счет взвешенных веществ и фитопланктона, а также частичное отражение от обнажающегося дна в ближнем инфракрасном диапазоне. Это приводит к смещению значений NDWI чистой воды в область отрицательных значений (от -0.05 до -0.1) что согласуется с выводами исследований динамических порогов (Ji et al., 2009). С другой стороны, увлажненные солончаковые прибрежные территории и

переувлажненные почвы в периоды весеннего снеготаяния формируют ложноположительные отклики с положительными значениями индекса (до +0.1 … +0.15) (Xu, 2006). В связи с этим в работе реализован подход динамического (адаптивного) определения порогового значения для каждой конкретной гидрологической ситуации.

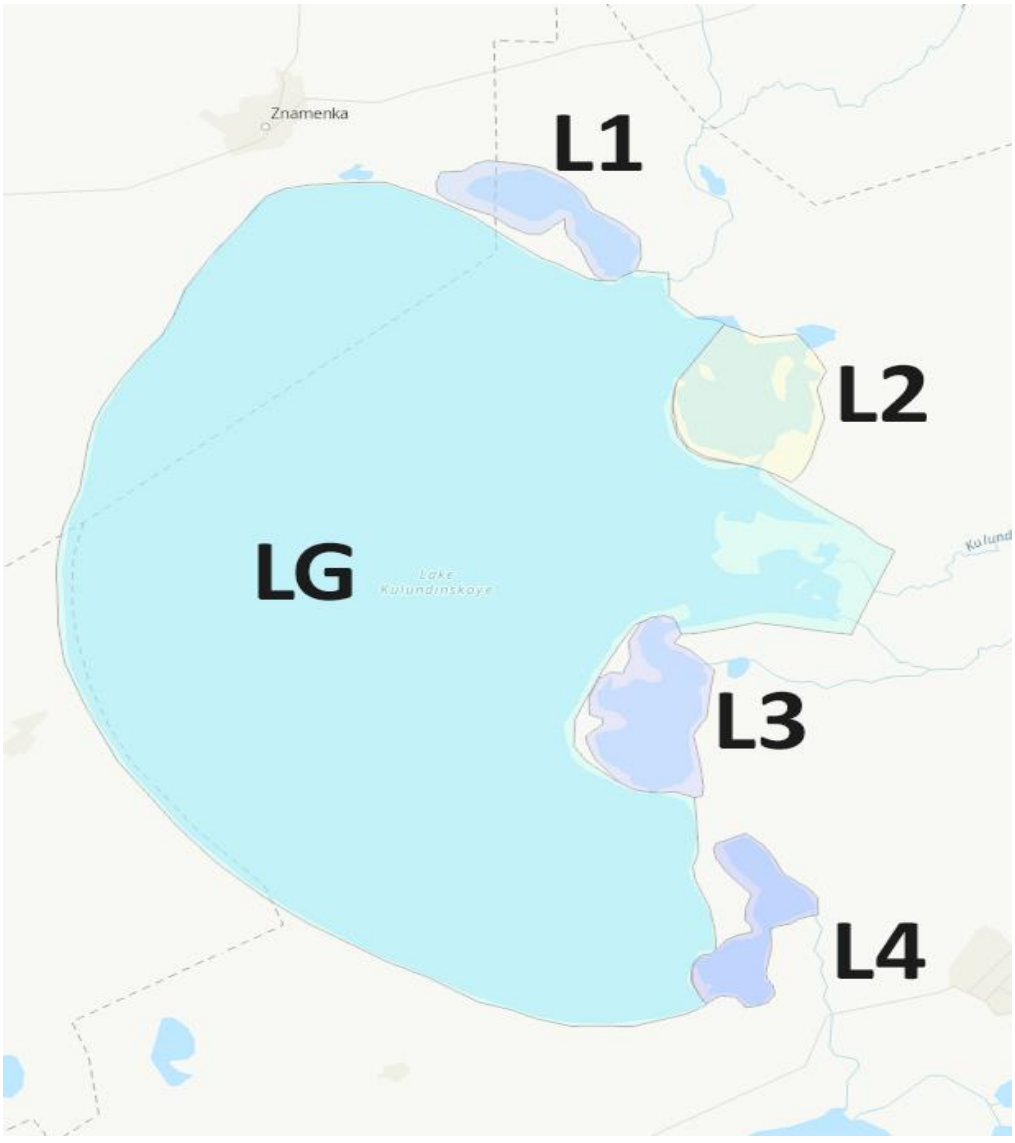


Рис. 1. Карта-схема исследуемой терриории и выделенные участки Кулундинского озера

После этапа адаптивной пороговой фильтрации полученное растровое изображение, содержащее бинарную матрицу (где логическая единица соответствует водной поверхности, а ноль — суше), подвергается процедуре

векторной конвертации. Перевод данных из растровой дискретной модели в векторную полигональную структуру необходим для расчета метрических и морфометрических характеристик объектов. Из результирующего векторного слоя исключаются мелкоконтурные полигоны площадью менее 0.01 км², которые представляют собой временные лужи, переувлажненные понижения рельефа или артефакты облачности, не имеющие отношения к исследуемой области.

Особенную техническую сложность представляет мониторинг сильно изменчивых бессточных водоемов, типичным представителем которых является Кулундинское озеро. Так, например, поверхность Кулундинского озера в периоды усыхания уменьшается и озеро распадается на несколько раздельных участков (рис. 1). Для корректного определения суммарной площади озера реализован алгоритм пространственного группирования (кластеризации): в пределах границы водного объекта выделяются все дискретные полигоны, идентифицированные как водные фрагменты. Расчет суммарной площади зеркала осуществляется путем математического суммирования площадей всех геометрически изолированных участков. Такой подход позволяет минимизировать погрешность недоучета площади водного зеркала.

Данные MODIS

Пространственное распределение термодинамической температуры (T) подстилающей поверхности оценивалось по ежедневным данным радиометров MODIS (платформа Terra и Aqua), полученные из открытой базы LP DAAC (URL: https://lpdaac.usgs.gov). Для определения значений использовались следующие версии продуктов LST: MOD11A1 Collection 6.1 и MYD11A1 Collection 6.1. В этих продуктах представлены дневные и ночные значения термодинамических температур поверхности с пространственным разрешением ±1 км и заявленной погрешностью ±1 K, а также указано время их измерения. Спецификой использования спутниковых данных теплового

ИК-диапазона является высокая уязвимость к мешающим факторам: полупрозрачной облачности, высотной дымке и температурным инверсиям в приземном слое. Для исключения недостоверных значений проводился анализ метаданных контроля качества, содержащихся в специализированных слоях масок Science Dataset (SDS) — QC_Day и QC_Night. Фильтрация исходных растров осуществлялась на основе анализа 8-битных флагов качества (Quality Assurance flags). К дальнейшей обработке допускались исключительно те пиксели, которые соответствовали наивысшему качеству данных. Пиксели, маркированные флагами наличия облачности или повышенной оптической толщи аэрозолей, исключались из таблицы.

Используемые для восстановления температур алгоритмы MODIS (Wan, 1999) основаны на результатах пассивного сканирования восходящего излучения с длиной волны 10-12 мкм, поэтому значения температур относятся к самым поверхностным слоям почв и водоемов.

2.3 Методика обработки данных спутника SMOS

Для дистанционного мониторинга водных объектов суши были использованы данные спутника SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity). Это спутник наблюдения Земли Европейского космического агентства (ESA), на котором установлен радиометр Microwave Imaging Radiometer Aperture Synthetic (MIRAS) – пассивный 2-D интерферометрический радиометр, работающий на частоте 1,413 ГГц (21 см, L-диапазон) и используемый для измерения микроволнового излучения подстилающей поверхности в виде яркостной температуры ($T_Я$), с помощью которой можно построить глобальные карты влажности почвы и солёности океана (Saavedra, 2018).

Для определения значений яркостных температур использовался продукт MIR_SCLF1C (спутниковые данные уровня обработки L1C) на горизонтальной поляризации под углом зондирования 42.5º, откалиброванный в единицах яркостных температур. Высота орбиты спутника составляет 763

км. Погрешность определения изменяется от ±3 К в центре до ±6 К на краях полосы захвата, ширина которой 890 км. Съемка исследуемой территории производится около 7 и 20 часов местного времени на горизонтальной и вертикальной поляризациях в диапазоне углов зондирования от 0º до 55º. Разрешающая способность радиометра при рабочих углах зондирования изменяется от 30 до 50 км, при зондировании под углом 42.5º составляет 45 км (URL: https://earth.esa.int/eogateway/catalog/smos-science-products).

Несмотря на то, что диапазон 1400–1427 МГц законодательно зарезервирован для пассивных радиоастрономических исследований (URL: https://base.garant.ru/72767122/, URL: https://www.itu.int/pub/R-REG-RR), данные SMOS подвержены сильному влиянию радиочастотных помех (Radio Frequency Interference, RFI) из различных источников, таких как радары, передающие антенны сотовой связи и телевизионные передатчики. Поэтому для обнаружения и подавления RFI для яркостных температур L1C использовались инструменты фильтрации данных (инструментарий SMOS-Box от ESA (URL: https://earth.esa.int/eogateway/tools/smos-toolbox). На регистрируемый сигнал оказывают влияние и космические источники излучения. В процессе обработки вводятся поправки: пиксели, в которых расчетная доля отраженного излучения превышает допустимый порог, маскируются и исключаются из дальнейшего анализа.

Геодезическая сетка DGG ISEA 4H9

Данные SMOS уровня L1C привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 (Sahr et al., 2003), состоящей из 2 621 442 шестиугольных ячеек, которые покрывают весь земной шар. Линейный размер ячейки составляет около 16 км. Такое соотношение масштаба сетки и разрешающей способности радиометра обеспечивает корректное с точки зрения критерия Найквиста представление результатов измерений. При этом значение каждой ячейки площадью 195 км^2 характеризует радиоизлучательную способность

значительно большего участка подстилающей поверхности (площадью от 700 до 2 000 км^2, в зависимости от угла зондирования), содержащего эту ячейку.

В общем случае в ячейку геодезической сетки ISEA 4H9 попадают участки подстилающей поверхности, различающиеся по яркостным характеристикам. Вклад различных типов подстилающей поверхности в суммарное радиоизлучение всего пикселя пропорционален их площади, а также физико-химическим свойствам, определяющим их радиоизлучательные параметры. Точность восстановления яркостных характеристик природных объектов, площадь которых мала по сравнению с общей площадью пикселя, зависит также от количества, площади и свойств других подстилающих поверхностей, вносящих вклад в суммарное радиоизлучение пикселя.

Валидация спутниковых данных микроволнового диапазона

Формула, определяющая величину яркостной температуры подстилающей поверхности, имеет следующий вид (см. например, (Шарков, 2014)):

$$T_{\text{Я}} = \chi T_{\text{эфф}} \quad (1)$$

где χ – коэффициент излучения поверхности (для абсолютно чёрного тела $\chi = 1$), $T_{\text{эфф}}$ – эффективная температура подстилающей поверхности в скин-слое $L_{\text{эфф}}$, определенном как величина, обратно пропорциональная коэффициенту поглощения γ: $L_{\text{эфф}} = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{|\varepsilon|}\,tg\,\delta} = \frac{1}{2k_0\kappa} = \frac{\lambda}{4\pi\kappa} = \frac{1}{\gamma}$, k_0 – волновое число в свободном пространстве.

Если в пиксель SMOS попадали участки с разными излучательными характеристиками, то использовалась формула (2), имеющая вид:

$$T_{\text{Я}} = \sum_{j=1}^{n} T_{\text{Я}}^{j} S_j, \quad (2)$$

где $T_{\text{Я}}^{j}$, S_j – яркостные температуры отдельных участков, а также их площади.

В этом случае яркостная температура $T_{\text{Я}}^{i}$ отдельного i-того участка площадью S_i, при известных значениях $T_{\text{Я}}^{j}$ и S_j для прочих участков, рассчитывалась по формуле (3):

$$T_{Я}^{i} = \frac{\left(T_{Я} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} T_{Я}^{j} S_j\right)}{S_i}, \quad (3)$$

где $T_{Я}$, $T_{Я}^{i}$, $T_{Я}^{j}, S_j, S_i$ – яркостные температуры ячейки и входящих в нее i, j участков, а также их площади (Романов и др., 2024).

2.4 Методика полевых и лабораторных исследований

Отбор экспериментальных образцов (почвы, воды, растительности) для лабораторных исследований производился на территории Алтайского края на тестовых участках, различающихся для почвенного покрова – по влажности, гранулометрическому составу, степени развития растительности, для водных объектов – по солёности воды. Экспериментальные исследования диэлектрической проницаемости почв проводились с помощью лабораторной установки, предназначенной для измерений диэлектрических свойств жидких и сыпучих материалов. Установка работает по принципу мостовых измерений. Блок-схема установки, собранной на базе промышленного измерителя разности фаз и отношения амплитуд ФК2-18 (рис. 2) (Романов и др., 2024).

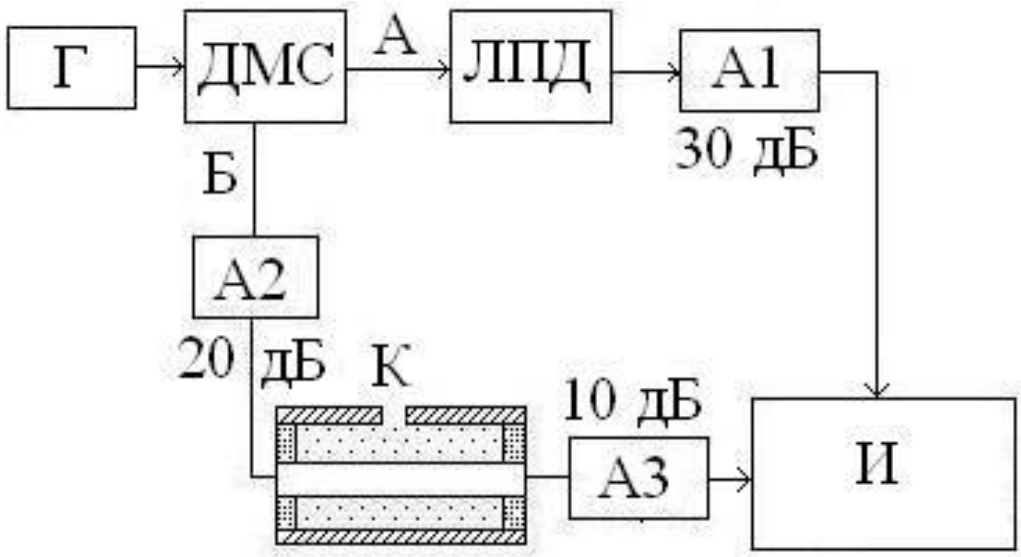


Рис. 2. Схема установки мостового типа на основе измерителя разности фаз

В состав установки входят следующие элементы: Г – генератор сигналов высокочастотный типа Г4-78 (1.16–1.78 ГГц), ДМ – делитель мощности согласованный; ЛПД – линия переменной длины; А1, А2, А3 – аттенюаторы согласующие коаксиальные; И – измерительный блок фазометра; К – контейнер для образца, выполненный в виде коаксиального отрезка линии. Интерпретирующие формулы, служащие для расчетов комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) по результатам измерений в мостовых схемах, получаются из решения электродинамической задачи о прохождении волны через слой диэлектрика конечной толщины, помещенного в однородную регулярную линию передачи. Измеряемыми величинами являются модуль ослабления $|A|$ и фаза φ комплексного коэффициента прохождения, которые могут быть пересчитаны в действительную и мнимую части КДП.

Процесс измерений заключался в следующем. С помощью ДМ производилась балансировка мостовой схемы, в плечо которой устанавливался пустой эталонный контейнер, по амплитудным и фазовым характеристикам идентичный измерительному. Сигнал от генератора подается на ДМ и делился поровну между опорным (А) и измерительным (Б) каналами. В начале измерений, при отсутствии в контейнере исследуемого образца, устанавливалось нулевое значение разности фаз и амплитуд на фазометре.

Практически для начальной балансировки моста использовался эталонный пустой контейнер, конструктивно эквивалентный рабочему с такими же метрологическими характеристиками. Затем вместо эталонного устанавливался контейнер с образцом и по индикатору измерителя ФК2-18 отсчитывались значения разности фаз и затухание.

Согласно паспортным данным ФК2-18, диапазон однозначных измерений фазы составляет ±180°; диапазон измерения ослабления – от 0 до 60 дБ; погрешности измерения ослабления и фазы составляли 0.2 дБ и 0.2°. Это соответствует относительной погрешности не более 7% для коэффициента излучения χ, расчет которого производился для угла визирования 42.5°.

Для установления зависимостей коэффициента излучения почвы от объемной влажности $\chi(W)$ исследуемый образец высушивался в сушильном шкафу до полного удаления воды, что соответствовало объемной влажности $W = 0$. После этого измерялись диэлектрические характеристики сухого образца. Для изменения объемной влажности почвенного образца производилось его высушивание при комнатной температуре или увлажнение.

Объемная влажность определялась по формуле:

$$W = \frac{\rho}{\rho_B} Z_B \quad (4)$$

где $Z_B = M_B/M$ и $M_{\text{В}} = M - M_{\text{СУХ}}$ – массовая доля и масса содержащейся в образце воды; M и $M_{СУХ}$ – массы влажного и высушенного образцов; ρ и $\rho_B \approx 1$ г/см^3 – плотности образца и воды, соответственно.

Основной характеристикой диэлектрических свойств материальных сред, является комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) (Шарков, 2014):

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad (5)$$

где ε' – действительная, а ε'' – мнимая части КДП, i – мнимая единица.

Мнимая часть КДП характеризует потери энергии на поляризационное смещение заряженных частиц и создание токов проводимости в веществе. Она содержит поляризационную часть ε_p'' и вклад проводимости:

$$\varepsilon'' = \varepsilon_p'' + 60\sigma\lambda, \quad (6)$$

где σ – удельная проводимость, λ – длина волны. При записи формул (5) и (6) использована система единиц СИ.

Частотные зависимости действительной ε' и мнимой ε'' частей КДП, могут быть описаны известными формулами Дебая, имеющими вид:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{ОПТ} + \frac{\varepsilon_{СТАТ} - \varepsilon_{ОПТ}}{1 + \left(\frac{f}{f_\tau}\right)^2}, \qquad \varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_{СТАТ} - \varepsilon_{ОПТ}) \cdot \left(\frac{f}{f_\tau}\right)}{1 + \left(\frac{f}{f_\tau}\right)^2} + 60\sigma\lambda, \quad (7)$$

где f – частота электромагнитного излучения, $f_\tau = (2\pi\tau)^{-1}$ – частота релаксации, τ – время релаксации, $\varepsilon_{СТАТ}$ и $\varepsilon_{ОПТ}$ – статическая (на частоте f = 0 Гц) и оптическая (в диапазоне оптических частот) диэлектрические проницаемости образца, соответственно. Наряду с диэлектрической проницаемостью используют также комплексный коэффициент преломления

$$N = \sqrt{\varepsilon} = n + i\kappa, \quad (8)$$

где n и κ – показатели преломления и поглощения, соответственно.

Из (5) и (8) можно получить выражения, устанавливающие связь между действительной и мнимой частями КПД и показателями преломления и поглощения:

$$\begin{cases} \varepsilon' = n^2 - \kappa^2 \\ \varepsilon'' = 2n\kappa \end{cases}. \quad (9)$$

Для описания отражательных характеристик плоской электромагнитной волны от границы раздела «свободное пространство / диэлектрик» используются энергетические коэффициенты отражения для горизонтальной (r_H) и вертикальной (r_V) поляризаций падающего поля:

$$r_H = \left|\frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}\right|^2, \; r_V = \left|\frac{\varepsilon\cos\theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}{\varepsilon\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}\right|^2, \quad (10)$$

где θ – угол, отсчитанный от нормали к поверхности. При зондировании в надир ($\theta = 0$), записанные выражения примут следующий вид:

$$r = r_H = r_V = \left|\frac{\sqrt{\varepsilon}-1}{\sqrt{\varepsilon}+1}\right|^2 . (11)$$

Это выражение справедливо для гладких поверхностей с однородным распределением электродинамических параметров по глубине. Поверхность является гладкой, если при облучении она отражает падающую волну зеркально, и шероховатой, если отражение носит диффузный характер. Зеркальное отражение имеет место в том случае, когда для максимальных вертикальных размеров неровностей h_{max} выполняется критерий шероховатости Рэлея:

$$h\frac{\lambda}{16\cos\theta_{max}}, (12)$$

где λ – длина электромагнитной волны в первой среде (воздухе).

Для описания радиоизлучательных характеристик дисперсных сред используются яркостная температура $T_Я$ и коэффициент излучения χ, который может быть выражен через коэффициенты отражения (10):

$$\chi_{H,V} = 1 - r_{H,V} . (13)$$

Коэффициент излучения χ, связан с n и κ формулой (Комаров и др., 1997):

$$\chi = \frac{4n}{(n+1)^2+\kappa^2}, (14)$$

Величины $T_Я$ (1) и χ (14) – основные характеристики, описывающие радиоизлучательные свойства подстилающей поверхности.

Эффективная температура полупространства, имеющего температурный градиент в направлении оси z при приеме собственного теплового излучения, распространяющегося вдоль этой оси, может быть рассчитана по формулеё:

$$T_{эфф} = T_0 + \int_0^{\infty} \frac{dT}{dz} e^{-\int_0^{\infty} \gamma(z')dz'} dz, \quad (15)$$

где T_0 – температура поверхности, dT/dz – локальный градиент температуры, $\gamma(z)$ – коэффициент поглощения, определяемый по формуле:

$$\gamma(z) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon' - sin^2\,\theta}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - sin^2\,\theta} \right)^2} - 1 \right]}. \quad (16)$$

Если температурный градиент отсутствует, то $T_{эфф} = T_0$.

Для обеспечения непрерывного мониторинга температуры и влажности почвы была спроектирована и изготовлена измерительная автоматизированная система. Конструктивной основой прибора служит жесткая диэлектрическая труба из поливинилхлорида (ПВХ) длиной 120 см и внешним диаметром 40 мм. На внешней поверхности несущей трубы с фиксированным шагом 50 мм были закреплены 12 цифровых датчиков температуры серии TMP1075 и 12 датчиков влажности емкостного типа серии SEN0193 (рис. 3). Расположение измерительных элементов рассчитывалось таким образом, чтобы верхний измерительный кластер (№1) находился непосредственно на границе раздела сред «атмосфера–почва» (в поверхностном слое 0–5 см), а нижний (№12) обеспечивал фиксацию параметров на глубине 115–120 см (Рябинин и др., 2022).

Особое внимание было уделено технологии монтажа измерительной системы в полевых условиях для минимизации нарушения естественной структуры почвенного профиля. Бурение измерительной скважины выполнялось ручным грунтовым буром диаметром 50 мм. Поскольку диаметр скважины превышал диаметр измерительного зонда, для исключения образования воздушных пазух и предотвращения эффекта преимущественного стока атмосферных осадков (вертикальной фильтрации воды вдоль стенок трубы) была применена процедура послойной обратной засыпки.

Зазор между ПВХ-трубой и стенками бурового отверстия послойно (интервалами по 10 см) заполнялся извлеченным грунтом с соблюдением исходной стратификации. Чувствительные пластины емкостных датчиков влажности при монтаже ориентировались вертикально и плотно прижимались к стенкам пробуренного отверстия.

Рис. 3 Схема полевой установки для измерения температуры и влажности почвы

Электронно-компонентная архитектура разработанной системы спроектирована с учетом жестких требований к помехозащищенности и энергоэффективности при длительной автономной работе. Цифровые температурные датчики TMP1075 функционируют на базе интерфейса I2C и обладают 12-битным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), что обеспечивает локальное разрешение по температуре до 0,0625 °C. Погрешность температурных датчиков в интервале от -40 до +50°C не превышала ± 0.5°C (URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp1075.pdf).

Датчики влажности SEN0193 представляют собой устройства емкостного типа, работающие на принципе измерения диэлектрической проницаемости окружающей среды. В отличие от датчиков резистивного (кондуктометрического) типа, электроды SEN0193 изолированы от прямого контакта с почвенным раствором диэлектрическим слоем маски печатной платы, что предотвращает их электрохимическую коррозию и гарантирует долговременную стабильность градуировочных характеристик.

Выходным сигналом каждого датчика влажности является аналоговое напряжение (U). Аналоговый сигнал от емкостного датчика пересчитывался в объемную влажность почвы (W [см^3/см^3]) по экспериментально установленной зависимости $U(W)$, определенной гравиметрическим методом.

Градуировка выполнялась на образцах почв, отобранных непосредственно на месте будущей установки измерительного прибора с различных глубин. Массу образцов измеряли на электронных лабораторных весах SF-400D. Высушивание производили в сушильном шкафу 2В-151.

Выводы по главе 2.

Вторая глава диссертационного исследования формирует комплексную физико-географическую и методологическую базу, необходимую для изучения гидрологической и почвенной засух.

Выбор репрезентативных тестовых объектов, расположенных на территории юга Западной Сибири и в Центральной Азии характеризуются высокой пространственно-временной изменчивостью увлажнения данной территории, что делает их оптимальными полигонами для изучения особенностей проявления почвенных и гидрологических засух. Физико-географическая специфика выбранных участков определяет необходимость использования дистанционных методов, способных обеспечивать регулярный мониторинг на обширных территориях. В результате проведённых исследований сформирован новый подход к сбору информации, объединяющий методы полевых и лабораторных исследований с данными спутниковой съемки в оптическом, инфракрасном и микроволновом диапазонах спектра.

Разработана и адаптирована методика обработки данных микроволнового радиометра спутника SMOS. Предложенный алгоритм предварительной подготовки и фильтрации радиометрической информации L-диапазона гарантирует получение очищенных от шумов временных рядов излучательных характеристик (Романов и др., 2023; Рябинин, 2023; Романов и др., 2022).

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Методика дистанционного определения периодов фазового состояния внутренних водоёмов суши

Минеральные озёра, широко распространенные на Земном шаре и встречающиеся в разных регионах мира, чрезвычайны чувствительны к изменениям климата. Своеобразными индикаторами климатических изменений выступают уровень воды в них и площадь водной поверхности (Yan and Zheng, 2015). В маловодные периоды небольшие озера могут частично или полностью пересыхать (Waiser et al., 2009; Moore, 2016). Усыхание крупных озёр оказывает влияние на атмосферные и гидросферные процессы, происходящие в региональном масштабе. Атмосферный перенос токсичных солей с поверхности воды и высохшего дна озера способствует увеличению засоленности почв, что, в свою очередь, ведет к угнетению растительного покрова, изменению видового состава растительности и опустыниванию (Kamilli et al., 2016).

Оперативная информация о гидрологических изменениях крупных минеральных озер, имеет важное значение при планировании мероприятий по защите окружающей среды, адаптации общества к новым условиям жизнедеятельности, и может быть получена на основе дистанционных методов (Singh et al., 2018; Poursanidis et al., 2017). Важной задачей является изучение многолетней сезонной динамики яркостных температур $T_{Я}(D)$ водной поверхности в разных регионах Северной Евразии, зависящей от метеорологических условий (Panciera., 2011).

Микроволновое излучение водной поверхности минерального озера может изменяться в значительных пределах. Для дистанционного мониторинга высыхания минеральных озер применяются данные EOS/MODIS (MOD13Q1) (Wang, 2012), Landsat-5 TM и Landsat-8 (Gorji et al., 2012). В (Romanov et al., 2017) исследованы сезонные вариации $T_{Я}$ минеральных озер, площадь которых меньше пикселя SMOS. Сезонные вариации $T_{Я}$ зависят от температуры,

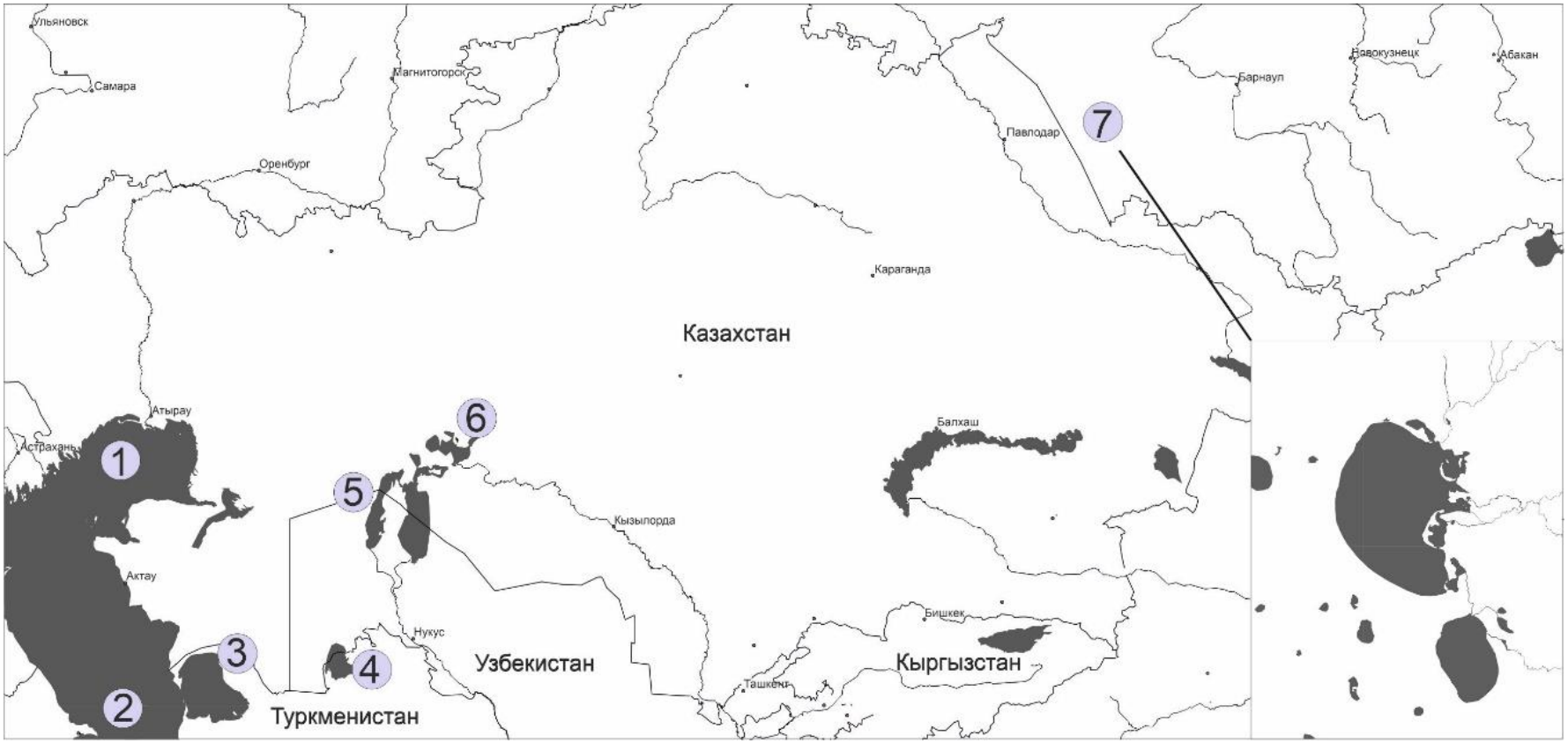


Рис. 4. Карта-схема расположения тестовых участков в Северной Евразии. 1, 2 – северная и южная части Каспийского моря; 3 – залив Кара-Богаз-Гол; 4 – озеро Сарыкамышское; 5, 6 – западная и северная части Аральского моря; 7 – озеро Кулундинское

солёности воды, толщины ледового покрова, образующегося в холодный период на поверхности воды.

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

На рис. 5а-ж приведены графики многолетней сезонной динамики $T_Я(D)$ тестовых участков с 2012 по 2022 годы. На всех графиках прямыми линиями обозначены многолетние зависимости $T_Я$ и T, позволяющие оценить происходящие изменения за период с 2012 по 2022 годы.

Каспийское море с заливом Кара-Богаз-Гол.

Вариации $T_Я(D)$ в северной части Каспийского моря (рис. 5а) связаны с сезонным образованием ледового покрова на водной поверхности, изменениями ледовитости, температуры и солёности поверхности моря. Значения $T_Я$ изменяются от 90 K в периоды открытой воды до 270 K в периоды ледостава. Вид зависимости $T_Я(D)$ характерен для водоемов с сезонным ледовым покровом, образующимся на поверхности воды. Цифрами 1-4 обозначены точки, соответствующие качественным изменениям характеристик микроволнового излучения подстилающей поверхности. Точка 1 (D_1) соответствует температуре начала замерзания солёной воды, изменения ее агрегатного состояния в результате образования льда. Точка 2 (D_2) соответствует толщине льда, равной скин-слою. Дальнейшее увеличение толщины льда не ведёт к заметному изменению $T_Я$, зависящей от температуры льда, наличия снежниц на поверхности льда во время оттепелей (Tikhonov, 2015). Точки 3 (D_3) и 4 (D_4) соответствуют

началу и окончанию таяния солёного льда. Соответственно с этим, специфической особенностью является существование четырех фаз состояния поверхности водоема с разными радиоизлучательными характеристиками, зависящими от температуры и солёности воды, толщины, температуры и солености льда: ($D_1 - D_2$) – открытая вода; ($D_2 - D_3$) – образование ледяного покрова с толщиной льда $d \leq L$ (L – скин-слой льда); ($D_3 - D_4$) – установившийся ледяной покров с толщиной $d \geq L$; ($D_4 - D_1$) – таяние ледового покрова.

Для южной части Каспийского моря $T_Я(D)$ (рис. 5б) имеет вид, характерный для незамерзающих в течение всего года минеральных водоемов. В этом случае $T_Я$ водной поверхности зависит от температуры и солености воды (Talone et al., 2010; Olmedo et al., 2016), а также от морского волнения и образования пены на поверхности моря (Yin et al., 2012).

На рис. 5в приведены зависимости $T_Я(D)$ для залива Кара-Богаз-Гол, являющегося крупнейшим в мире месторождением мирабилита и характеризующегося высокой концентрацией растворенных в воде солей (от 270 до 380 ‰, в зависимости от сезона, температуры поверхности воды и уровне Каспийского моря, способствующих обмелению залива) (Карпычев, 2007; Гинзбург и др., 2022). Как видно из графиков, $T_Я(D)$ и $T(D)$ находятся в противофазе. Подобное поведение $T_Я(D)$ может быть связано с особенностями растворения солей и в воде и особенностями их выпадения в осадок.

Аральское море.

Из анализа зависимостей $T_Я(D)$ для западной (рис. 5г) и северной (рис. 2д) частей АМ, а также спутниковых снимков в оптическом диапазоне следует, что в западной части АМ ледовый покров не образовывался позднее 2012 года. Для северной части АМ характерно ежегодное образование ледового покрова, различающееся по продолжительности периодов открытой воды и льда. Обводненные и высохшие участки Аральского моря характеризуются разными зависимостями $T_Я(D)$, изучение которых позволяет установить скорости гидрологических изменений и оценить их влияние на климат.

Озеро Сарыкамыш.

Значительные гидрологические изменения происходят с бессточным горько-соленым *Сарыкамышским озером*, работающим с 1960 годов как водоприемник коллекторно-дренажных вод, формируемых в Хорезмской (Республика Узбекистан) и Дашхаузской (Республика Туркменистан) областях. За последние 35 лет Сарыкамышское озеро превратилось из небольших солончаков в крупнейшее ирригационно-сбросовое озеро в бассейне Аральского моря. Минерализация воды в озере хлоридно-натриевая, соленость достигает 15-20 ‰. В последнее десятилетие исследования гидрологического состояния Сарыкамышского озера, а также других водных объектов Арало-Каспийского региона ведутся с использованием методов космического зондирования (Костяной и др., 2011).

Зависимость $T_Я(D)$ для Сарыкамышского озера приведена на рис. 5е. В зимние периоды 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014 годов на водной поверхности озера образовывался ледовый покров, что подтверждается спутниковыми снимками в оптическом диапазоне (URL: https://worldview.earthdata.nasa.gov). С конца 2014 года и по настоящее время ледовый покров не образовывался, что может быть связано с повышением массовой концентрации растворимых солей, приносимых коллекторно-дренажными водами (Романов и др. 2022).

Озеро Кулундинское.

Одним из крупнейших горько-соленых озер на юге Западной Сибири и крупнейшим в Алтайском крае является Кулундинское озеро, площадь которого в течение летнего сезона может изменяться на 25% (в зависимости от погодных условий и водности года). Соответственно с изменением площади озера также изменяется солёность воды (Галахов, 2003, Лебедева и др., 2008). На рис. 5ж приведены вычисленные для Кулундинского озера $T_Я(D)$ и $T(D)$. Динамика температуры водной поверхности озера определена по данным MODIS. Значения T усреднены по территории озера. Так как площадь озера меньше пикселя радиометра MIRAS, то производился перерасчет значений $T_Я$

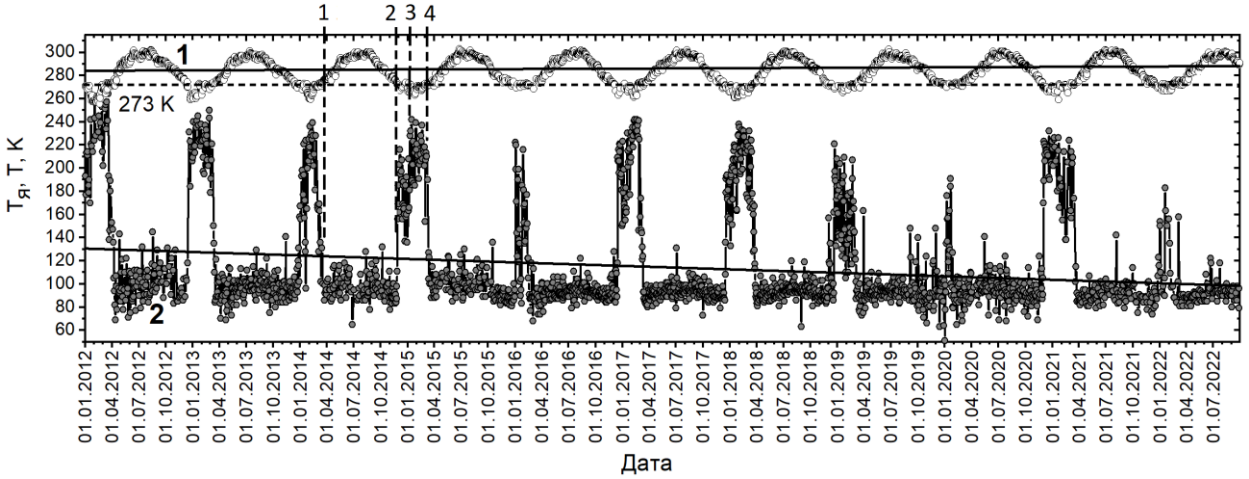
озера по формуле (3) для ячейки, формируемой только степью, и ячейки, формируемой Кулундинским озером (35%) и прилегающими к нему степными территориями (65%). T взяты с электронного ресурса "Расписание Погоды" (URL: https://rp5.ru/).

Приведенные на рис. 5-а-ж зависимости $T_{Я}(D)$ и $T(D)$ для исследованных озер были аппроксимированы прямыми линиями, имеющими следующий вид:

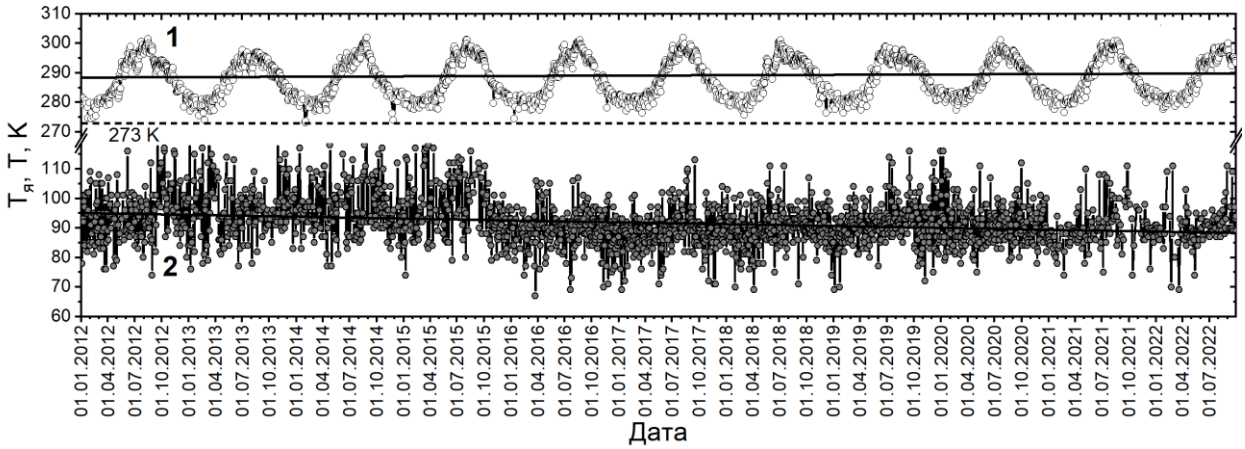
$$T_{Я} = A + B \times D,$$

$$T = C + D \times D,$$

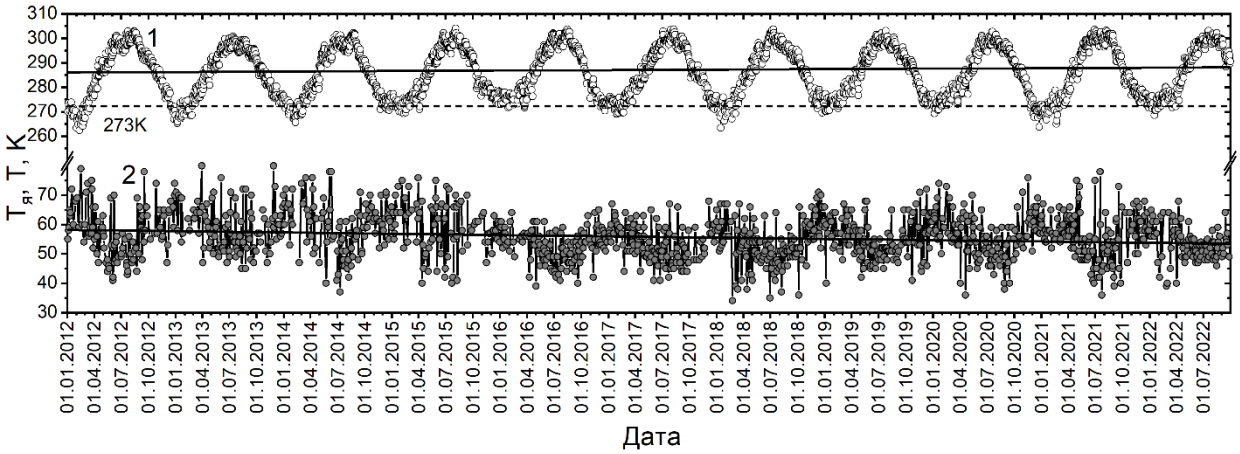
где A, B, C, D – численные коэффициенты, приведенные в таблице 1.



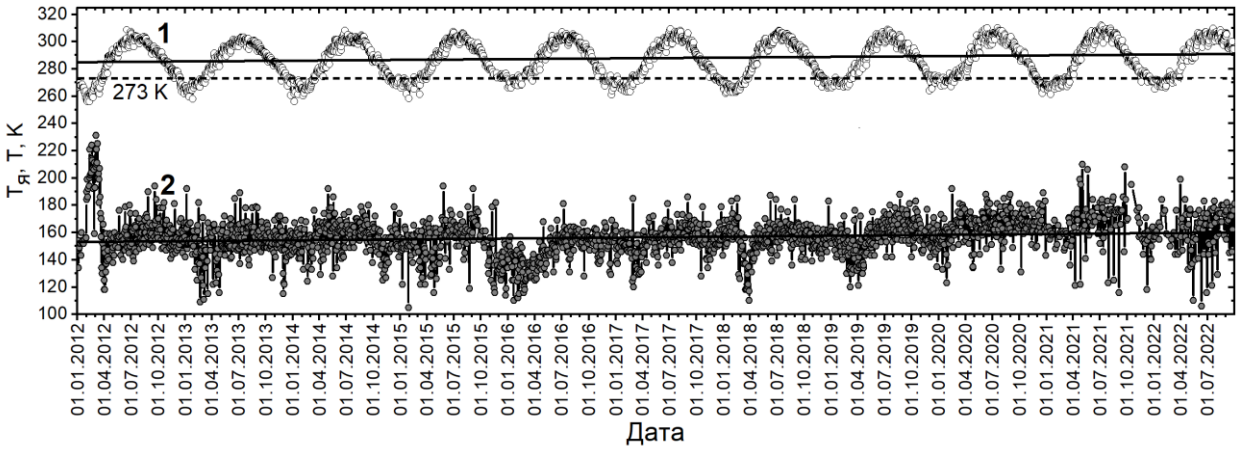
а)



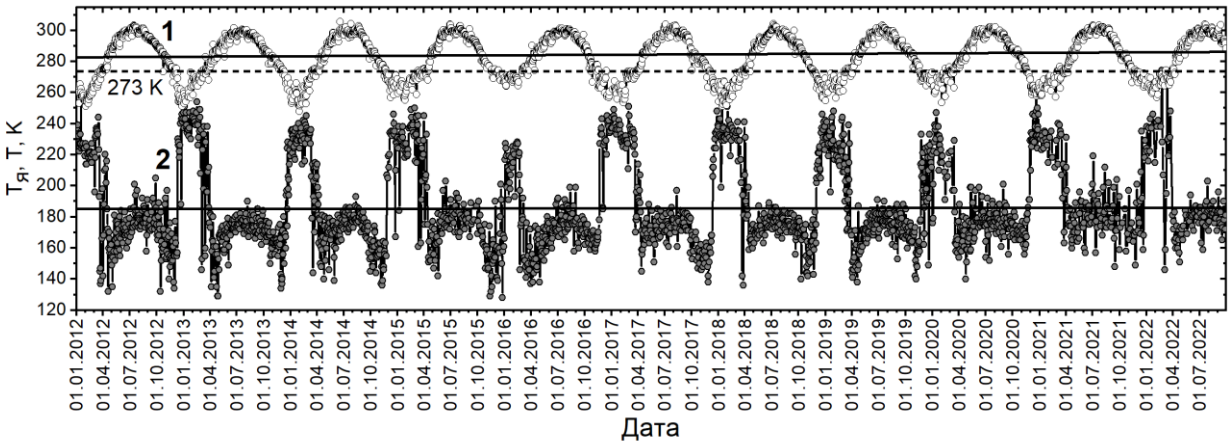
б)



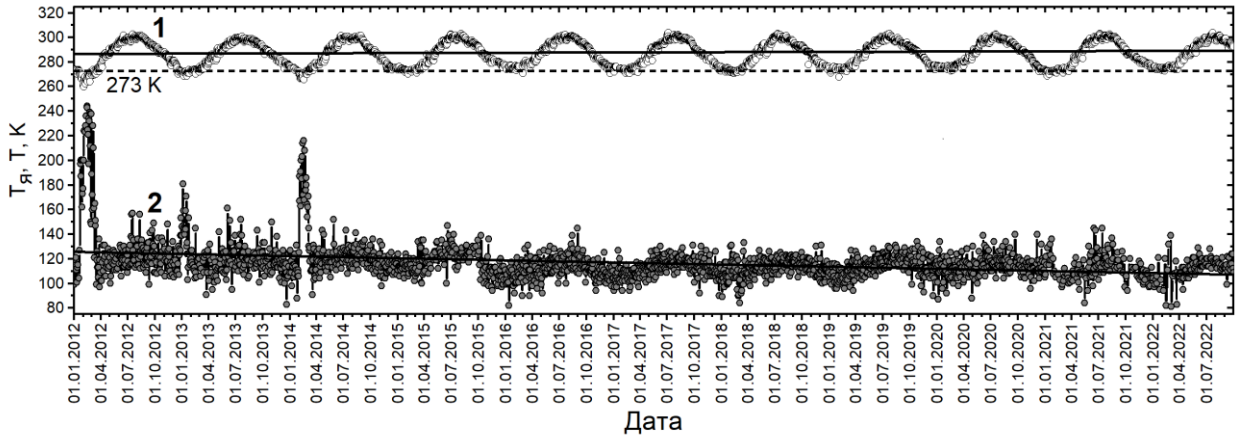
в)



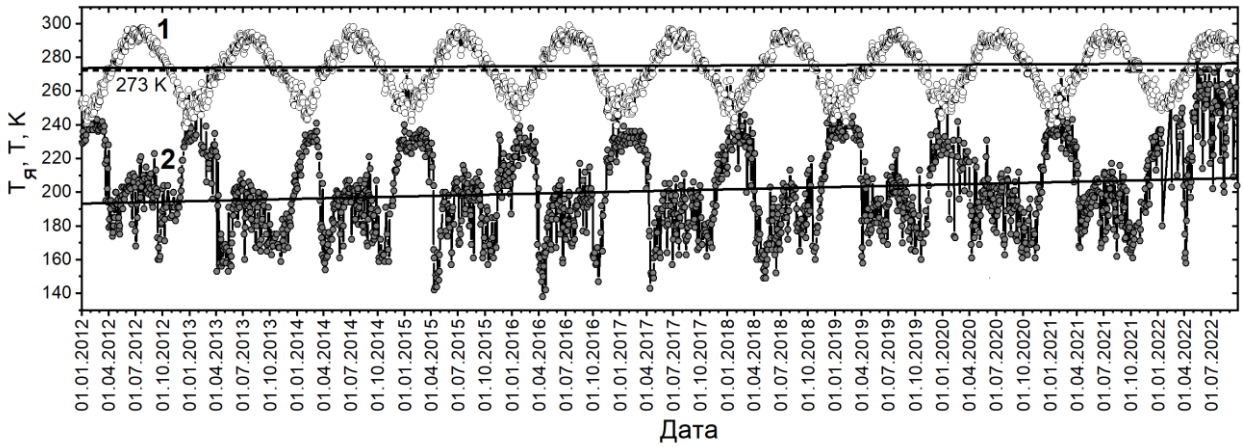
г)



д)



е)



ж)

Рис. 5. Сезонная динамика термодинамических (1) и яркостных (2) температур, измеренных на горизонтальной поляризации под углом зондирования 42.5º для северной (а) и южной (б) частей Каспийского моря; залива Кара-Богаз-Гол (в); западной (г) и северной (д) частей Аральского моря; Сарыкамышского озера (е); Кулундинского озера (ж)

Различие коэффициентов указывает на различие гидрологических изменений в разных регионах Северной Евразии. Из анализа спутниковых данных следует, что T ведёт себя по-разному, что может быть связано с различием климатических условий. Причинами понижения $T_Я$ водной поверхности озёр, расположенных в южной части Северной Евразии, может являться сокращение продолжительности холодного периода (за счет повышения температуры), колебания уровня воды в озерах, возрастание испарения и,

соответственно, увеличение солёности воды, ведущее к уменьшению коэффициента излучения водной поверхности. Для минеральных озер,

Таблица 1. Численные коэффициенты A, B, C, D в формулах (15) – (16).

Объект	Сезонный ледовый покров	A	B×10^{-4}	σ	C	D×10^{-4}	σ
1	+	20276	-82	0,04	-2214	10,2	0,01
2	–	4319	-17,2	0,05	-585	3,6	0,01
3	–	3038	-12,1	0,03	-1013	5,3	0,01
4	–	11748	-47,3	0,09	-1348	6,6	0,01
5	–	-4211	17,8	0,01	-3466	15	0,01
6	+	-413	2,4	0,1	-1872	8,8	0,01
7	+	-9269	38,5	0,03	-1479	7,1	0,03

σ – стандартное отклонение

расположенных в более высоких широтах, возрастание $T_Я$ может быть связано с сезонными процессами таяния снежного покрова в весенний период и уменьшением солености воды, а также обмелением озер в конце летнего сезона, образованием ледового покрова (Романов и др., 2022; Romanov et al., 2023).

Сезонная динамика яркостных температур.

Из приведенных на рисунке 5а-ж зависимостей $T_Я(D)$ видно для разных участков акватории и в разные годы динамика довольно разнообразна. 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.

На рис. 6. приведена сезонная динамика яркостной температуры водной поверхности для северной части Каспийского моря с наличием следующих периодов фазового состояния:

1. Начало периода открытой воды: D_1 – дата, начиная с которой значения яркостной температуры $T_Я$ не отличались более чем на 10% от характерных для водного периода значений $T_Я^W$ в течение не менее чем 10 дней:

$$\begin{cases} \delta T_Я = \left|\frac{T_Я - T_Я^W}{T_Я^W}\right| > 10\%, & \text{для } D = D_1 - 1 \\ \delta T_Я = \left|\frac{T_Я - T_Я^W}{T_Я^W}\right| \le 10\%. & \forall\, D \in [D_1; D_1 + 10] \end{cases}$$

2. Начало периода замерзания: D_2 – дата, начиная с которой значения яркостной температуры отличались более чем на 10% от характерных для водного периода значений в течение не менее чем 10 дней.

$$\begin{cases} \delta T_Я = \left|\frac{T_Я - T_Я^W}{T_Я^W}\right| \le 10\%, & \text{для } D = D_2 - 1 \\ \delta T_Я = \left|\frac{T_Я - T_Я^W}{T_Я^W}\right| > 10\%. & \forall\, D \in [D_2; D_2 + 10] \end{cases}$$

3. Начало периода установившегося ледового покрова: D_3 – дата, начиная с которой значения температуры $T_Я$ не отличались более чем на 10% от характерных для ледового периода значений $T_Я^I$ в течение не менее чем 10 дней.

$$\begin{cases} \delta T_Я = \left|\frac{T_Я - T_Я^I}{T_Я^I}\right| > 10\%, & \text{для } D = D_3 - 1 \\ \delta T_Я = \left|\frac{T_Я - T_Я^I}{T_Я^I}\right| \le 10\%. & \forall\, D \in [D_3; D_3 + 10] \end{cases}$$

4. Начало периода вскрытия: D_4 – дата, начиная с которой значения яркостной температуры отличались более чем на 10% от характерных для ледового периода значений в течение не менее чем 20 дней.

$$\begin{cases} \delta T_{Я} = \left|\frac{T_{Я} - T_{Я}^{I}}{T_{Я}^{I}}\right| \leq 10\%, & \text{для } D = D_4 - 1 \\ \delta T_{Я} = \left|\frac{T_{Я} - T_{Я}^{I}}{T_{Я}^{I}}\right| > 10\%. & \forall\, D \in [D_4; D_4 + 20] \end{cases}$$

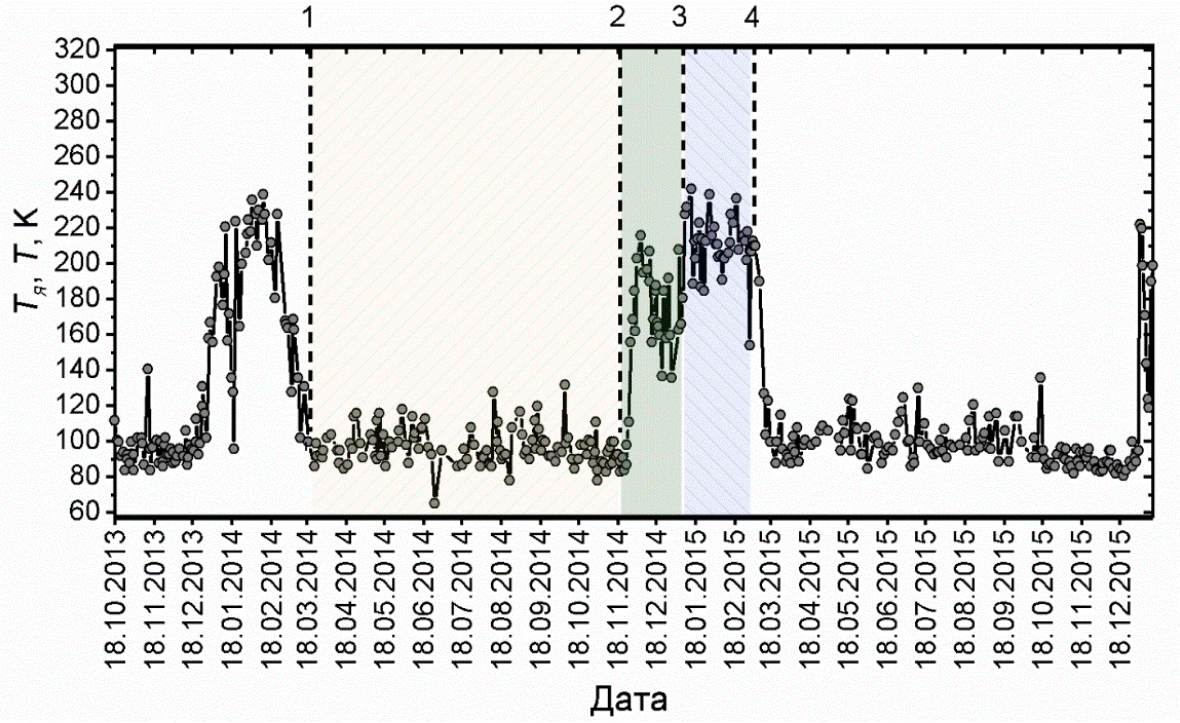


Рис. 6. Сезонная динамика яркостной температуры водной поверхности с наличием разных гидрологических фаз: 1-2 – открытая вода; 2-3 – образование ледяного покрова; 3-4 – ледяной покров; 4-1 – таяние ледяного покрова

Для каждой устойчивой фазы существуют допустимые статистические колебания значения яркостной температуры, которые в зависимости от географического расположения эти колебания могут составлять от 5 - 20 К. Они связаны изменением таких параметров как: волнение водной поверхности, суточные колебания термодинамической температуры подстилающей поверхности.

3.2 Дистанционный индекс гидрологической засухи (индекс усыхания водоемов на примере Кулундинского озера)

В данном разделе приведены результаты 10-летних исследований сезонных вариаций яркостных температур гипергалинного Кулундинского озера,

расположенного на территории Кулундинской равнины (юг Западной Сибири), характеризующейся засушливым климатом с малым годовым количеством атмосферных осадков. На их основе предложен новый подход к разработке дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи.

Объектом исследования являлись акватория Кулундинского озера и окружающая его территория, попадающие в пиксель спутника SMOS (рис. 7). Кулундинское озеро является одним из крупнейших минеральных озер Российской Федерации. Основным источником питания озера являются пресноводные реки и ручьи, подземные воды и осадки. В течение внутривековых циклов колебаний водности и ежегодного усыхания площадь водной поверхности озера может изменяться от 728 до 615 км². Озеро мелководное, средняя глубина озера составляет 2.5-3 метра, максимальная глубина 4 м, берега пологие. При абсолютной высоте 99.7 м над уровнем моря площадь озера составляет около 700 км², а объем воды 2.1 км^3. По химическому составу вода из озера относится к сульфатно-хлоридным рапам (Лебедева и др., 2008; Догановский и др., 2015).

Прилегающая к озеру территория представляет собой степь, свободную от древесной растительности. Суммарная площадь лесов, включая защитные лесополосы, составляет менее 0.01%. Таким образом, ландшафты, попадающие в пиксель спутника SMOS, представлены непосредственно водной поверхностью озера, прилегающими к озеру степными участками, а также осушенными участками, образовавшимися в результате усыхания озера. Площадь обнажившегося дна озера различается в разные периоды летнего сезона. Площади участков, попадающих в пиксель SMOS, оценивались с погрешностью не более 3% путем маскирования спутниковых снимков оптического диапазона.

Для определения яркостной температуры подстилающей поверхности использовался продукт L1C SMOS для угла зондирования 42.5º на горизонтальной и вертикальной поляризациях, привязанный к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9.

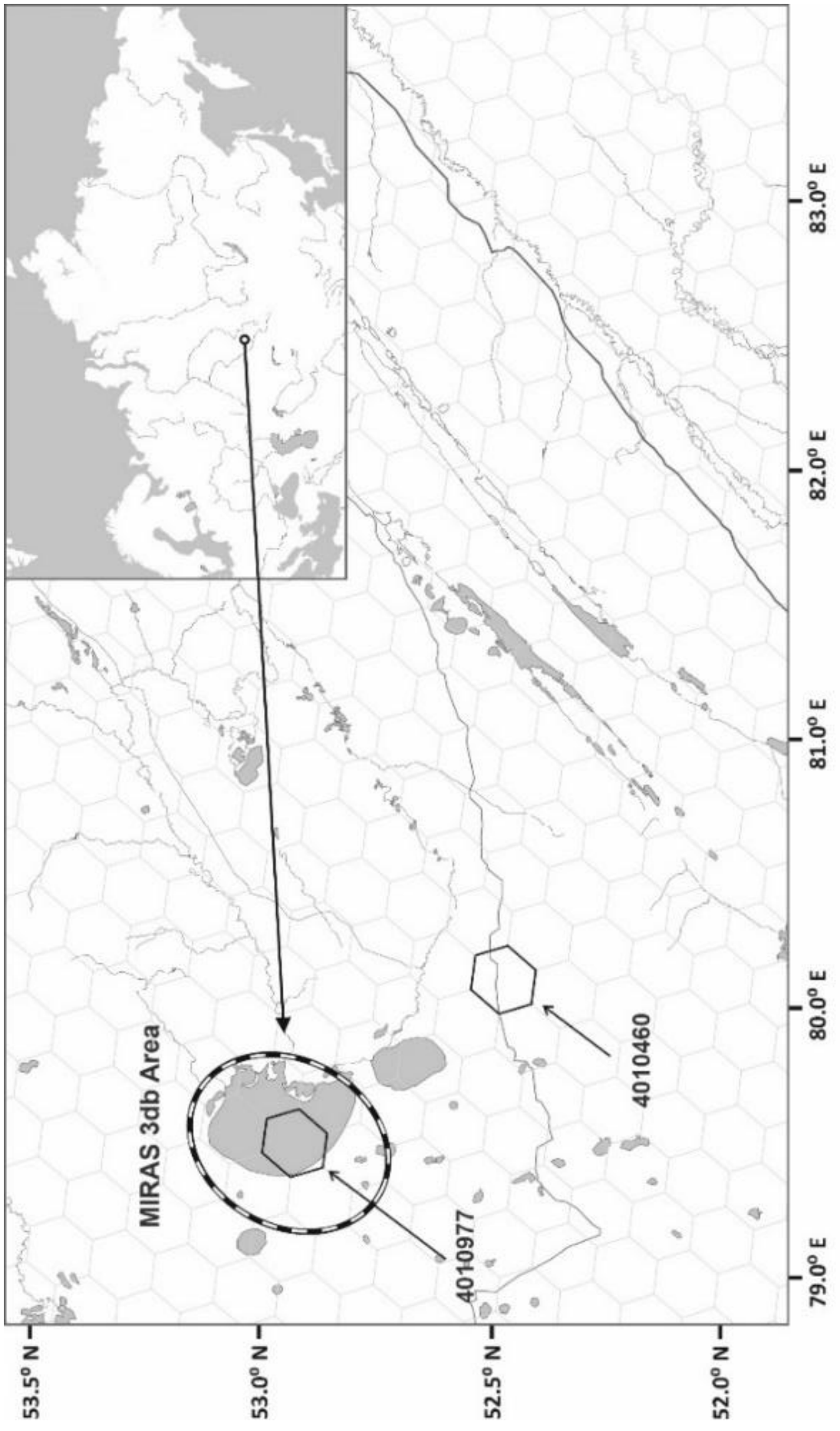


Рис. 7. Карта-схема исследуемой территории с геодезическими ячейками

$T_Я$ пикселя SMOS формируется водной поверхностью Кулундинского озера, максимальная площадь которого составляет в зависимости от времени года 35-44% от площади зондируемого участка, и прилегающей степью (56-65%). $T_Я$ может быть рассчитана по формуле

$$T_Я S = T_Я^С S_С + T_Я^О S_О^{max}. \quad (17)$$

Здесь $T_Я, T_Я^С,$ – яркостные температуры пикселя, включающего степь и озеро (ячейка № 4010977), и пикселя, включающего только степь (№ 4010460), $T_Я^О$ – яркостная температура озера, $S_С,\ S_О^{max}$ – площади степи и озера, $S = S_С + S_О^{max}$ – суммарная площадь пикселя.

Преобразуем формулу к следующему виду:

$$T_Я^О = T_Я^С + \left(T_Я - T_Я^С\right)\frac{S}{S_О^{max}}, \quad (18)$$

В процессе ГЗ происходит усыхание озера в результате чего первоначальная площадь озера ($S_О^{max}$) уменьшается до $S_О$ и на месте высохшего озера появляются участки осушенного дна общей площадью $S_Д$. Для озера с осушенными участками дна запишем выражение

$$T_Я^О S_О^{max} = T_Я^В S_О + T_Я^Д S_Д, \quad (19)$$

где $T_Я^В, T_Я^Д$ – яркостные температуры водной поверхности и осушенного дна.

Учитывая, что $S_О^{max} = S_О + S_Д$, преобразуем выражение (19) к виду

$$(T_Я^О - T_Я^В)S_О^{max} = (T_Я^Д - T_Я^В)S_Д, \quad (20)$$

Используя полученное соотношение (20), введем дистанционный микроволновый индекс ГЗ (усыхания озера) как отношение площади осушенного дна к первоначальной площади озера.

$$G = \frac{S_Д}{S_О^{max}} = \frac{T_Я^О - T_Я^В}{T_Я^Д - T_Я^В}. \quad (21)$$

Введенный дистанционный микроволновый индекс гидрологической засухи *G* может быть определен по спутниковым изображениям в оптическом диапазоне (Sentinel 2, уровень L2a NDWI), однако в этом случае сильно увлажненный грунт может восприниматься как водная поверхность, что приведет к значительному возрастанию погрешности. В то же время в микроволновом диапазоне диэлектрические и радиоизлучательные характеристики солёной воды и влажного грунта заметно различаются (Романов и др., 2023).

На рис. 8 приведены значения площади озера S_O, определенные по спутниковым изображениям в оптическом диапазоне. Видно, что сезонное поведение S_O в разные годы различно, например, с 2013 по 2015 и с 2019 по 2021 годы S_O к концу летнего сезона уменьшается. Это может быть связано с обводнением в весенний период участков, высохших в предыдущем летнем сезоне, и малым количеством осадков в летний и осенний периоды. В период с 2017 по 2018 годы наблюдается обратное поведение сезонной динамики S_O, связанное с тем, что S_O к концу теплого сезона увеличивается.

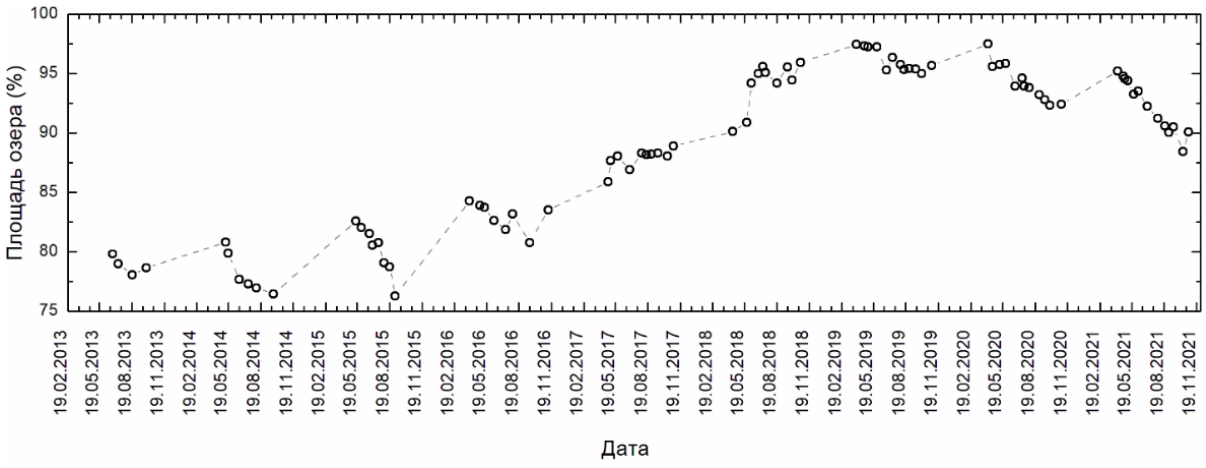


Рис. 8. Площадь водной поверхности Кулундинского озера, определенной по данным спутника Sentinel 2

Выявленная цикличность (2-4 года) может быть связана с неравномерным распределением осадков в течение года, малым количеством снега, накопленного в зимний период, и увеличением жидких осадков в осенний период.

Определение термодинамической температуры осушенного дна $(T_Д)$ озера по данным MODIS MxD11A1 затруднено недостаточно высоким разрешением данных (1000 м) по сравнению с обычными размерами участков. Однако в годы, когда уровень воды значительно опускается, открываются участки дна достаточной площади, чтобы считать, что соответствующие измерения MODIS характеризуют именно этот тип подстилающей поверхности.

Разные типы подстилающей поверхности характеризуются разными значениями термодинамических температур.

Степь: $T_С$ – температура участка степи, удалённого от границы водной поверхности и суши более чем на 5 км в течение всего периода наблюдений.

Водная поверхность: $T_В$ – температура водной поверхности, удалённой от границы водной поверхности и суши более чем на 5 км в течение всего периода наблюдений.

Осушенное дно: $T_Д$ – температура участка осушенного дна озера площадью более 2 км^2 который с 2012 по 2016 годы (первые 5 лет наблюдений) не затапливался водой в течение всего сезона, при этом оставаясь удалённым от границы водной поверхности и суши на расстояние более 1 км. С 2017 года, вследствие увеличения уровня воды в озере, этот участок частично или полностью затапливался.

Для примера на рис. 9 приведена динамика $T(D)$ в утренние и вечерние часы за период с 2012 по 2023 годы в трёх точках в районе оз. Кулундинское.

В летний период суточные колебания $T_С$ достигают 25 К, а $T_В$ не превышают 3-5 К. Суточные колебания $T_Д$, наблюдавшиеся в период с 2012 по 2016 годы, весьма схожи по размаху с $T_С$. Абсолютные значения $T_Д$ также ближе к значениям $T_С$ (особенно в вечернее время), чем к значениям $T_В$. Однако совпадения $T_С$ и $T_Д$ не достигается. При оценке линейной корреляционной связи между $T_Д$ и $T_В$ выяснилось, что абсолютные значения $T_Д$ стабильнее всего на разных временных интервалах коррелируют со значениями $T_В$. При этом утренние и вечерние измерения следует рассматривать по отдельности. На

рис. 10 представлены измерения $T_{\text{Д}}$ с мая по октябрь в 2012-2016 годах, аппроксимированные формулой

$$T_{\text{Д}}(T_{\text{В}}) = \begin{cases} 1{,}4044 \cdot T_{\text{В}} - 105{,}7, \text{вечер}, R = 0{,}95, T_{\text{В}} = 273 \dots 303\ \text{К}, \\ 1{,}0692 \cdot T_{\text{В}} - 23{,}8, \text{утро}, R = 0{,}95, T_{\text{В}} = 273 \dots 303\ \text{К}. \end{cases}$$

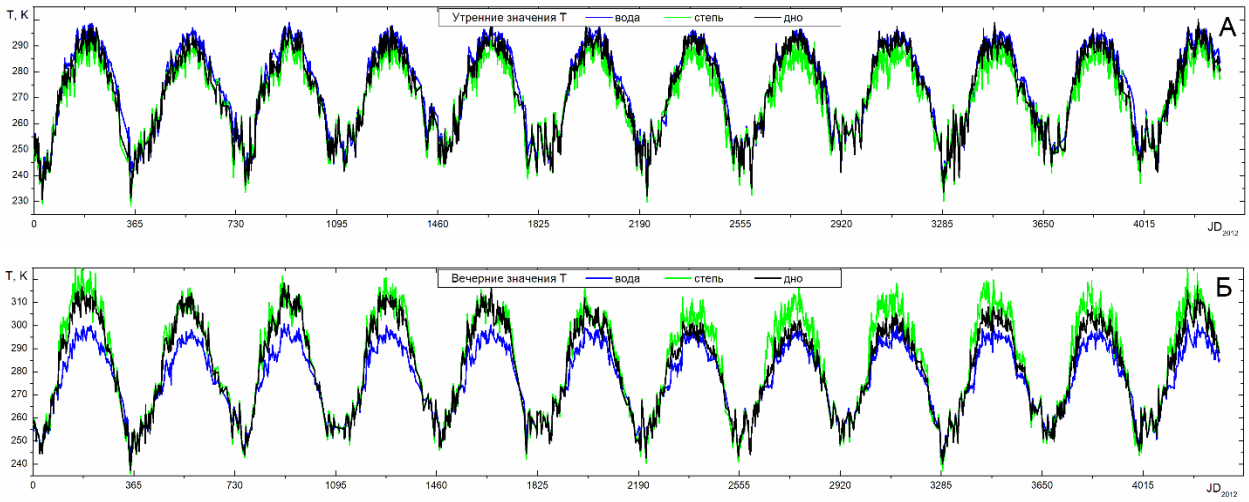


Рис. 9. Динамика утренних (А) и вечерних(Б) (по UTC) значений $T_{\text{С}}$, $T_{\text{В}}$, $T_{\text{Д}}$

На первом этапе оценивали излучение всего объекта (водная поверхность + периодически оголяющееся дно). Для этого из сигнала ячейки 4010977, содержащей объект и степь, исключали вклад степи.

$$T_{\text{Я}}^{O} = T_{\text{Я}}^{4010460} + (T_{\text{Я}}^{4010977} - T_{\text{Я}}^{4010460}) \cdot \frac{S_{MIRAS}}{S_O^{max}} \quad ,$$

$$S_{MIRAS} = 2040\text{км}^2, S_O^{max} = 720\text{км}^2.$$

Исходя из модельных представлений об излучении водной поверхности и осушенного дна, результатов измерений диэлектрических характеристик воды и донных отложений, дистанционных данных $T_{\text{В}}$, $T_{\text{Д}}$, определяли долю площади осушенного дна по отношению к максимальной площади озера по формуле (21), в которой $T_{\text{Я}}^{\text{В}}, T_{\text{Я}}^{\text{Д}}$ рассчитывали по формулам

$$T_{\text{Я}}^{\text{В}} = \chi_H^{\text{В}} \cdot T_{\text{В}}, T_{\text{В}} = 273 \dots 303\ \text{К},$$

$$T_{\text{Я}}^{\text{Д}} = \chi_H^{\text{Д}} \cdot T_{\text{Д}}, T_{\text{Д}} = 273 \dots 303\ \text{К},$$

$$\chi_H^{\text{В}}(T) = 0{,}527 - 1{,}24 \cdot 10^{-3} \cdot T,\ \sigma = 0{,}004. \quad (22)$$

$$\chi_H^{\text{Д}}(T) = 1{,}45162 - 0{,}0033 \cdot T,\ \sigma = 0{,}003. \quad (23)$$

где $\chi_H^{\text{В}}$, $\chi_H^{\text{Д}}$ – коэффициенты излучения воды и донного грунта, σ – среднеквадратическая погрешность.

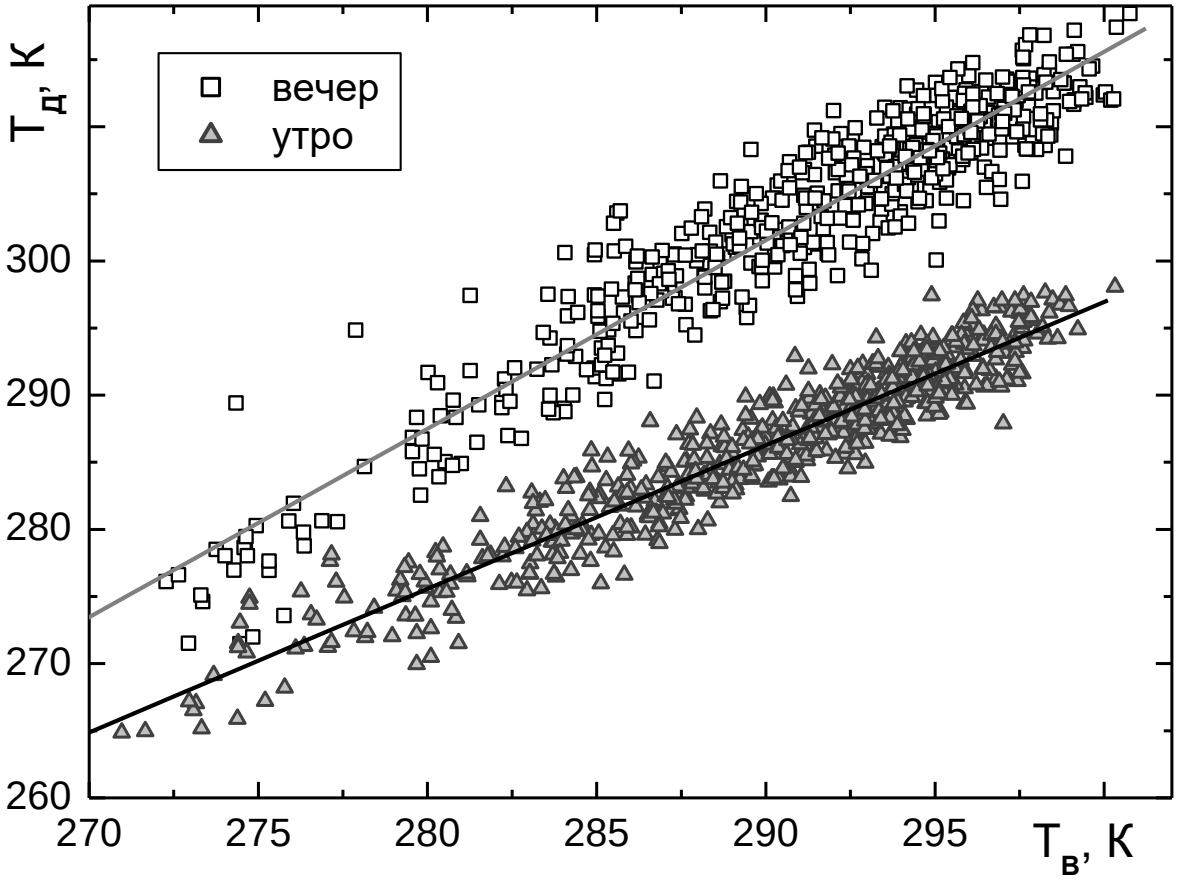


Рис. 10. Линейная зависимость $T_{\text{Д}}(T_{\text{В}})$.

Лабораторные измерения диэлектрических характеристик образцов воды из Кулундинского озера и донного грунта проводили на частоте 1.41 ГГц в интервале температур 280-320 К для угла зондирования 42,5º.

График многолетней динамики (2012-2022) $T_{\text{Я}}^0$ приведен на рис. 11. К данным L1C предварительно применялся критерий селекции, исключающий данные с радиометрической погрешностью более 5 К (единичные случаи).

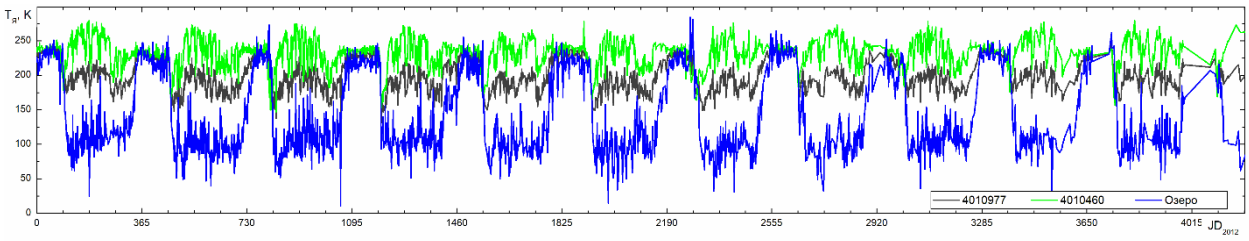


Рис. 11. Динамика $T_Я(D)$ для ячеек SMOS

Динамика G, рассчитанная по формуле (21), приведена на рис. 12А. С целью снижения случайной погрешности, связанной неточным определением площади пикселя SMOS, а также площадей суши и озера, попадающих в пиксель, производилось сглаживание данных и расчет скользящего среднего с периодом 20 дней. Для возможности анализа спутниковых данных и рассчитанных значений G на рис. 12Б приведена многолетняя (с 2012 по 2022 годы) динамика дождевых осадков.

Согласно определению, G изменяется от 0 до 1. При G = 0 вся акватория озера покрыта водой. Так как на частоте 1.41 ГГц скин-слой для соленой воды (110-140 г/л) не превышает долей сантиметра, то в этом случае наличие слоя воды толщиной в несколько миллиметров на поверхности оголенного дна по данным микроволнового зондирования может быть интерпретировано как водная поверхность. Соответственно, дождевые осадки, смачивающие поверхность осушенного дна, могут привести к ошибке интерпретации спутниковых данных микроволнового диапазона.

При G = 1 возникает ситуация, когда все озеро высохло. Для небольших по площади и неглубоких степных соленых озер Кулундинской равнины, пересыхающих в течение жаркого лета и наполняющихся в весенний период, подобная ситуация не является редкой. Для крупного озера высыхание может оказаться катастрофическим и сопровождаться уничтожением сложившейся экосистемы озера.

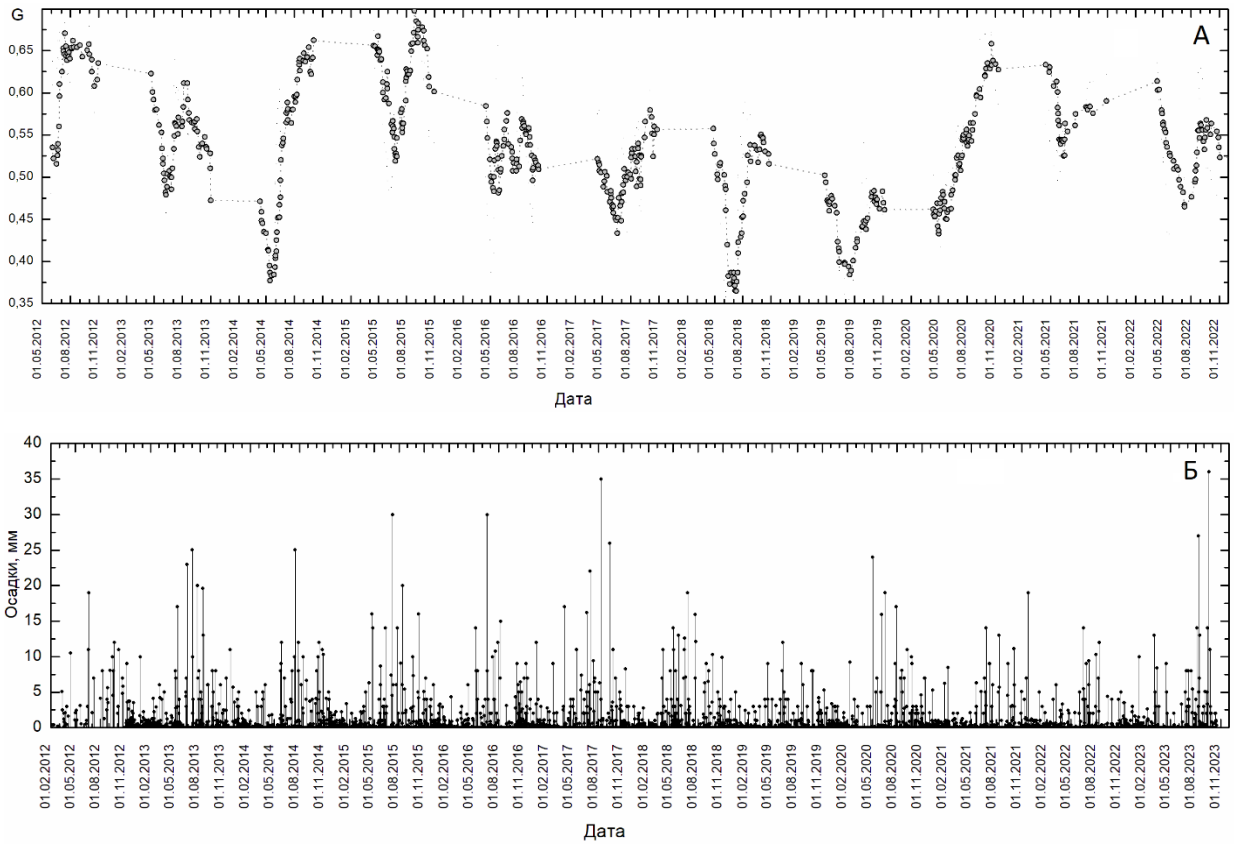


Рис. 12. Многолетняя динамика G (А) и осадков (Б) для Кулундинского озера.

При дистанционном микроволновом зондировании также следует учитывать тот факт, что образование в зимний период на поверхности соленого озера ледяного покрова (соленого льда) может затруднить оценку усыхания озера за счет значительных различий диэлектрических характеристик льда, соленого грунта и соленой воды. При этом диэлектрические характеристики соленого льда оказываются более близкими к диэлектрических характеристикам соленого грунта, нежели соленой воды. Соответственно, в зимний период, оценка G может быть связана со значительной погрешностью.

Использование разработанного алгоритма оценки усыхания минерального озера и расчета дистанционного микроволнового индекса ГЗ было апробировано на Кулундинском озере. Данный алгоритм может быть использован для территории с несколькими усыхающими озерами, пропадающими в пиксель спутникового радиометра, до их полного усыхания и образования на их месте солончаков. Для глубоких озер, расположенных в

котловинах с высокими берегами, данный алгоритм неприемлем, так как в этом случае при усыхании озера будет изменяться в первую очередь его глубина, а не площадь. Для дистанционного контроля уровня воды в водоемах суши находят широкое применение методы радиолокационной альтиметрии.

Погрешность дистанционной оценки площади усыхания озера и определения G зависит от следующих факторов:

1. При вычислении вклада озера в пиксель SMOS используется значение сигнала в опорной ячейке, удалённой от берега озера на расстояние 50 км. Почвы этих двух участков схожи по засолённости и, соответственно, диэлектрическим свойствам. Но пространственная неравномерность выпадения осадков и, следовательно, разная степень увлажненности излучающей поверхности на двух участках может приводить к различию их $T_Я$ даже при одинаковых T, которые также могут для двух участков почв различаться. Это может приводить к ошибкам в определении $T_Я^O$ озера.

2. При вычислении $T_Я^O$ по формуле (18), в алгоритме максимальная площадь озера принимается равной 720 км^2, а условная площадь пятна диаграммы направленности антенны ДНА MIRAS (Microwave Imaging Radiometer Using Aperture Synthesis) – 2040 км^2. Эти оценки могут быть недостаточно точны, что приводит к ошибкам в определении $T_Я^0$. Пятно ДНА по уровню 3 db представляет собой пересечение поверхности земли с конусом, ось которого составляет угол около 42,5° к нормали – деформированный эллипс с осями примерно 35 и 65 км. Ориентация осей эллипса не постоянна (изменяется от одного измерения к другому), а положение центра эллипса может удаляться от центра ячейки на расстояние до 8 км. Эти статистически не слишком существенные по сравнению с масштабом исследуемого объекта колебания положения и площади пятна ДНА могут приводить к заметным погрешностям в определении $T_Я^0$. Для снижения погрешности в данной работе рассчитывались скользящие средние G с периодом 20 дней.

3. $T_Я$ и T подстилающей поверхности используются в расчёте совместно, однако их измерение со спутников происходит не одновременно. Утром интервал между измерениями с разных спутников составляет 2-3 часа. Т измеряются около 4-5 часов местного времени, $T_Я$ – около 6-7 часов. По результатам наших наземных экспедиций установлено, что в это время суток $T_В$ и $T_Д$ не испытывают существенной динамики. Различия не превосходят 2-3 К. Чтобы считать такое утверждение справедливым на протяжении всего периода наблюдений, требуется провести долговременный подспутниковый мониторинг температур поверхности. В вечернее время интервал между измерениями с разных спутников составляет более 3 часов. Значения $T_В$ и $T_Д$ могут заметно изменяться за это время, особенно летом. Для минимизации ошибок следует отказаться от использования данных спутниковых измерений в вечерний период.

4. При расчете индекса G, помимо $T_Я^0$, $T_В$, $T_Д$, определяемых дистанционно, алгоритм опирается на модельные зависимости (22)-(23), полученные в лабораторных условиях для конкретных значений солёности озёрной воды и влажности донных отложений. Эти характеристики, влияющие на $T_Я$ подстилающей поверхности, могут испытывать значительные колебания значений, например, за счёт выпадения жидких осадков.

3.3 Дистанционный микроволновый индекс почвенной засухи

В данном разделе дистанционный микроволновой индекс почвенной засухи (Remote Microwave Soil Drought Index – RMSDI), протестированный в Алтайском крае. Полевые исследования проводились в Кулундинской степи (КС) (рис. 13).

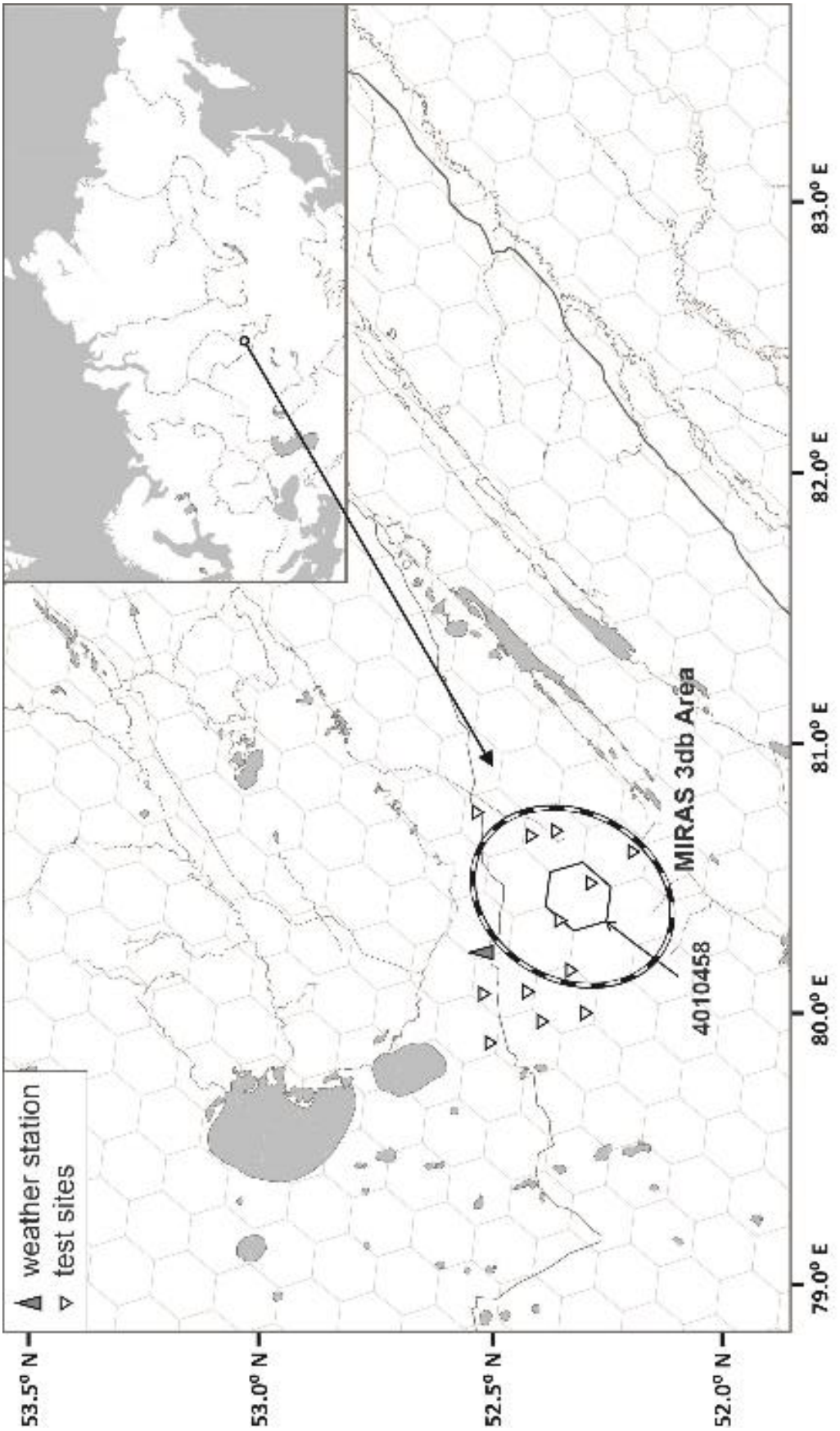


Рис. 13. Карта исследуемой территории: 4010458 – ячейка DGG ISEA 4H9, черно-белый контур – пиксель SMOS

Исследуемая территория представляет собой плоскую равнину, покрытую низкорослой растительностью с незначительной биомассой. В течение периода измерений растительность страдала от недостаточного увлажнения, вызванного засухой. Многие растения погибли из-за нехватки воды. По данным MODIS, площадь озер и источников воды в пикселе SMOS составила менее 0,1%. Общая площадь леса также была незначительной. Почвы исследуемой территории представлены илистыми суглинками. В естественных условиях плотность (ρ), температура (t) и объемная доля воды (W) в поверхностном слое почвы (0-5 см) изменялись в пределах ρ = 1,06-1,35 г/см^3; $\rho_{сух}$ = 1,05-1,2 г/см^3; W = 0,05–0,28 см^3/см^3; T = 18–60°C.

По данным многолетних агрогидрологических наблюдений зафиксирована слабая почвенная засуха при $W \leq 0{,}08$ см^3/см^3, а сильная засуха при $W \leq 0{,}055$ см^3/см^3. Влажность устойчивого увядания варьировала от 0,084 до 0,091 см^3/см^3 (при $\rho_{влаж}$ = 1,08-1,15 и $\rho_{сух}$ = 1,0-1,07 г/см^3).

При дистанционном зондировании в дециметровом диапазоне (1,4 ГГц) с низким пространственным разрешением (спутник SMOS), ровной поверхностью и незначительной биомассой растительности для расчета $T_Я$ используют формулу (1) (Шарков, 2014)

$$T_Я = \chi \cdot T_{эфф},$$

где, χ, $T_{эфф}$ – коэффициент излучения и эффективная температура кожного слоя подстилающей поверхности. Для установления экспериментальных зависимостей $\chi(W)$, согласно формуле (14), проводились измерения n, κ почв.

Термодинамическая температура на поверхности почвы T зависела от погодных условий и изменялась в летний период в течение суток от 298 до 333 К. С глубины 15–20 см T стабилизировалась и в течение суток изменялась в пределах 296–298°C.

SMOS пролетал над районом исследования в 07:00 утра и в 20:00 вечера по местному времени. Для проведения эксперимента были выбраны данные утреннего пролета. К этому времени поверхность почвы остывала до 298-

303 К. Экспериментально установленная зависимость градиента температуры T(Z) имели вид

$$T = 299.92 - 0.07378 \cdot Z,\ 0 \le Z \le 70 \text{ см}.$$

Для расчета $T_{эфф}$ использовали соотношение, установленное для почв исследуемой территории:

$$T_{эфф} = T_0 - \frac{0.07378}{0.13644 + 3.3354 \cdot W_Z},$$

где W_Z – градиент W в слое Z.

В летний период зависимости W_Z имеют вид,

$$W_Z = W_0 \pm A \cdot Z$$

где A = (2–6) 10-4, – эмпирический коэффициент, зависящий от погодных условий.

Для исследуемой территории обобщенную зависимость (n, κ)(W) (рис. 14) аппроксимировали прямыми линиями. Измерения n и κ проводили в диапазоне почвенной влажности $W = 0 – W_{max} = 0{,}45$ см^3/см^3. На графиках выделяются два интервала W с разным поведением n и κ: $0 – W_t$ и $W_t – W_{max}$, где $W_t = 0{,}11$ см^3/см^3 соответствует содержанию объемной доли влаги при переходе из связанной воды в свободную. Диэлектрические свойства связанной и свободной воды заметно различаются.

В таблице 2 представлены значения n_0, κ_0 ($W = 0$, $\rho_{сух} = 1{,}06$ г/см^3), n_t, κ_t ($W = W_t$), n_w, κ_w ($W = W_{max}$) (определяется по рисунку 14).

Таблица 2. Числовые значения n, κ, χ для различных W.

n_0	n_t	n_w	κ_0	κ_t	κ_w
1.25	1.87	4.22	0.001	0.22	0.41

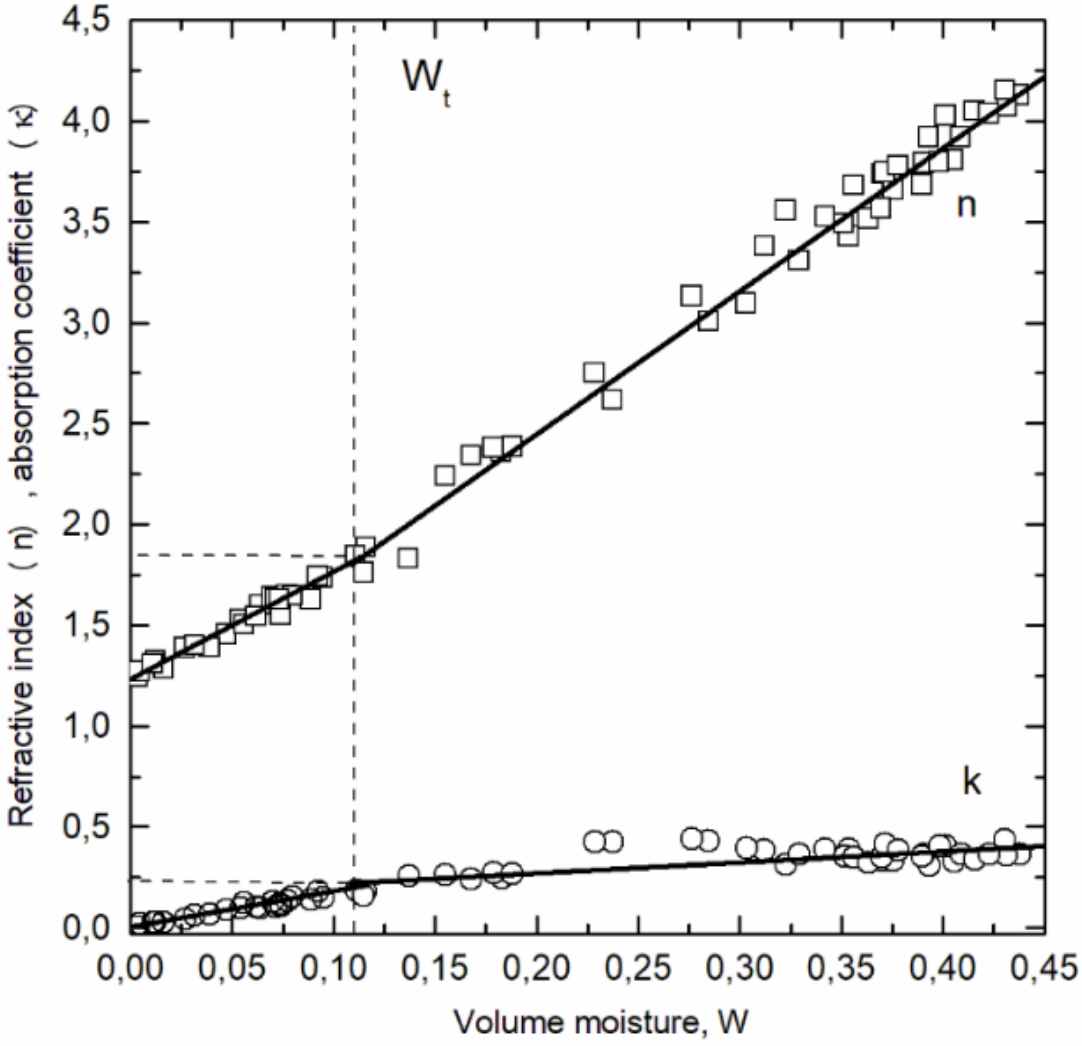


Рис. 14. Зависимости показателя преломления (n) и коэффициента поглощения (κ) от *W* ($\rho_{сух}$=1,06 г/см^3).

Используя установленные соотношения, обратную зависимость $W(\chi)$ можно представить следующим образом:

$$W = \begin{cases} \mathrm{A} - \mathrm{B} \cdot \chi, & \chi_t \le \chi \le \chi_0, \\ \mathrm{C} - \mathrm{D} \cdot \chi, & \chi_w \le \chi \le \chi_{t.} \end{cases} \qquad (24)$$

Для горизонтальной поляризации и θ= 42,5º. После простых преобразований запишем соотношение (24) в стандартизированном виде:$\chi_0 = 0.94;\ \chi_t = 0.81, \chi_w = 0{,}50.$

$$W = \begin{cases} W_t \frac{\chi_0 - \chi}{\chi_0 - \chi_t}, & \chi_t \le \chi \le \chi_0, \\ W_t + (W_{max} - W_t) \frac{\chi_t - \chi}{\chi_t - \chi_w}, & \chi_w \le \chi \le \chi_t. \end{cases} \qquad (25)$$

Значение χ_t может быть получено из одновременных дистанционных измерений χ и полевых измерений *W*, или из диэлектрических измерений диэлектрической проницаемости почвы при различных значениях *W*. Следует отметить, что полевые измерения *W* являются довольно трудоемкими, диэлектрические измерения требуют специализированного оборудования и программного обеспечения. В отличие от χ_t, величина W_t может быть измерена большинством почвенных лабораторий.

Для широкого практического применения соотношения (24)-(25) были аппроксимированы $\chi_t(W_t)$ линейной зависимостью

$$\chi_t = 0.62521 - 0.69621 \cdot W_t, \sigma = 0{,}0097, R = -0.97,$$

где *R* – коэффициент корреляции, σ – среднеквадратическая ошибка.

При $W \leq W_t$ в почве присутствует только недоступная (для растений) связанная вода. Величина χ_t может служить радиофизической характеристикой почвенной засухи (SD). Значения χ соответствуют следующим режимам увлажнения почвы: $\chi_t < \chi \leq \chi_0$ – недостаток воды в почве; $\chi_W < \chi \leq \chi_t$ – количество воды, достаточное для растений. Условия почвенной засухи реализуются, когда $\chi_t \leq \chi$, достигая своего максимума при $\chi = \chi_0$. Для оценки степени влажности почвы (включая засуху и заболачивание) мы вводим дистанционный микроволновый индекс почвенной засухи (*RMSDI)* как отношение длин интервалов в разных диапазонах влажности

$$RMSDI = \begin{cases} \frac{\chi_t - \chi}{\chi_0 - \chi_t}, \chi_t \leq \chi \leq \chi_0, \\ \frac{\chi_t - \chi}{\chi_t - \chi_w}, \chi_w \leq \chi \leq \chi_t. \end{cases} \quad (26)$$

Отношение между *RMSDI* и *W* равно

$$RMSDI = \begin{cases} (W/W_t - 1), \chi_t \leq \chi \leq \chi_0, \\ (W - W_t)/(W_{max} - W_t), \quad \chi_w \leq \chi \leq \chi_t. \end{cases} \quad (27)$$

В таблице 3 приведены численные значения *W* и *RMSDI*, соответствующие градациям степени увлажнения территории, используемой для агрометеорологии. *Зависимость RMSDI(W)* показана на рис. 15.

Таблица 3. Соответствие *W* и RMSDI степени влажности, используемой в агрометеорологии.

N	*W, (см³/см³)*	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

На рисунке 15 пунктирными линиями обозначены интервалы *RMSDI*, соответствующие различным градациям степени влажности. В этой местности влажность почвы недостаточна почти в течение всего вегетационного периода, включая периоды слабой и сильной засухи. Это подтверждают натурные измерения *W* (рис. 16).

На рис. 17 представлены графики сезонной динамики *W(D)*, *RMSDI(D)* для тестового полигона в 2022 г. Значения *W* и *RMSDI* рассчитывали по спутниковым измерениям $T_{Я}$ *(SMOS)* и *T (MODIS)*. Видно, что $W < W_t = 11$ см^3/см^3 в течение значительной части летнего сезона.

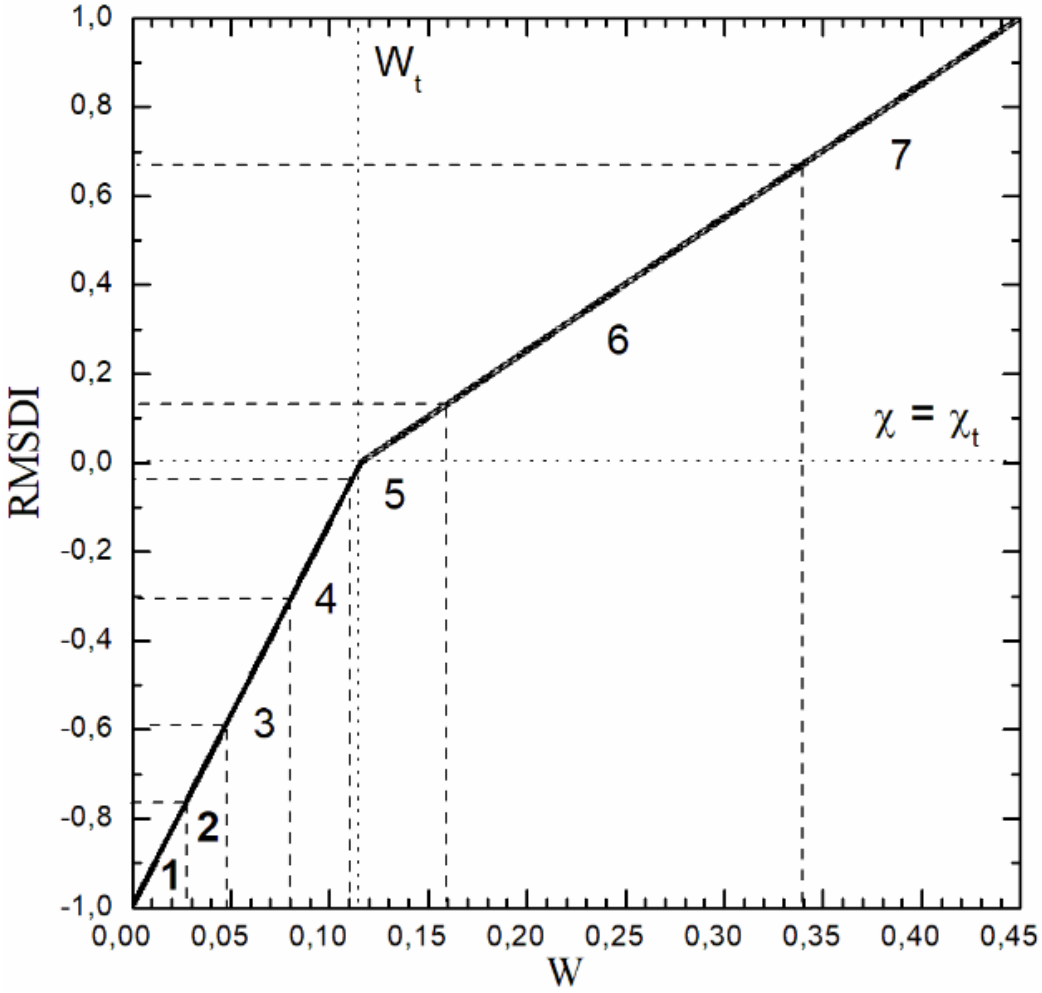


Рис. 15. Зависимость RMSDI(W): 1-7 – степень влажности (табл. 3).

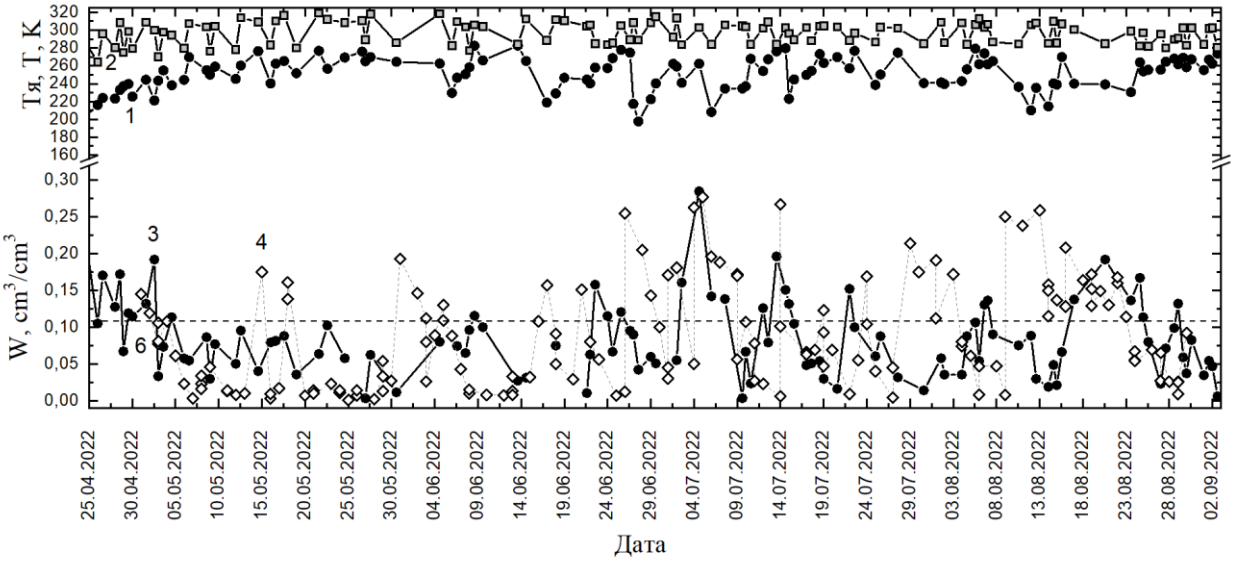


Рис. 16. Сезонная динамика $T_Я$ (1), T (2), W (3): 4 – алгоритм SMOS, 5 – естественные полевые измерения, 6 – точка увядания

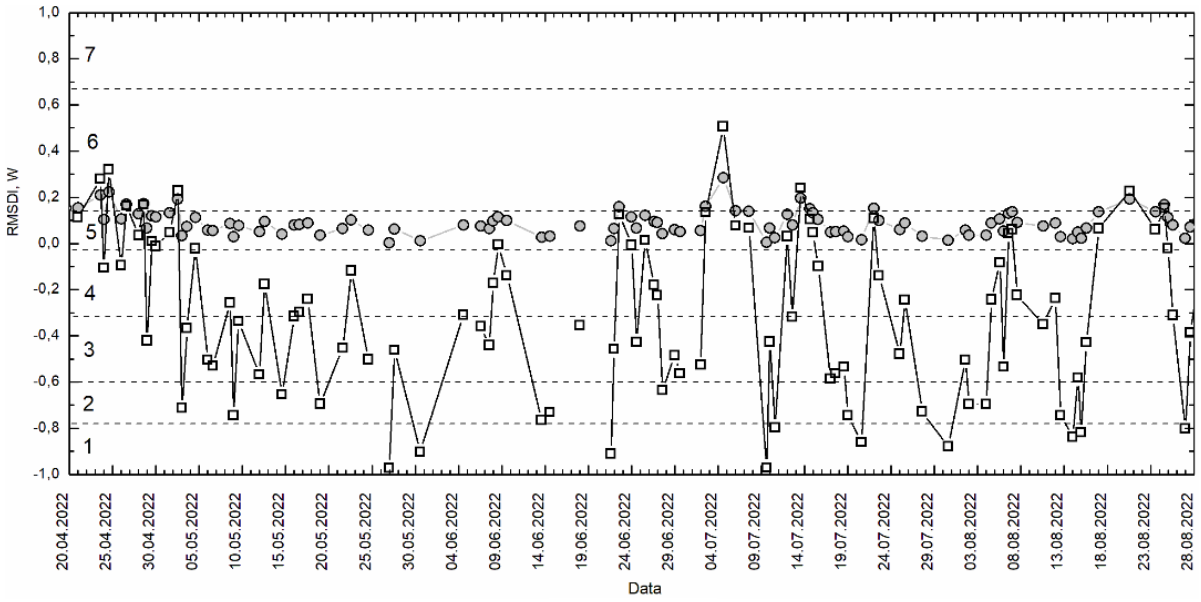


Рис. 17. Значения *W* и *RMSDI* рассчитанные по спутниковым измерениям $T_Я$ *(SMOS)* и *T (MODIS)*

Погрешность дистанционного определения *W* зависит от плотности, текстуры и засоленности почв. Для оценки *W* используется алгоритм L2SM SMOS с заявленной погрешностью менее 0,04 $см^3/см^3$. По результатам спутниковых измерений $T_Я$, *T* и зависимостей *W(χ)* построены схематические карты пространственного распределения *W* и *RMSDI* (для W_t = 0,11) (рис. 18 и 19).

Точность в дистанционной идентификации *W* в значительной степени ограничена, так как разные типы подстилающей поверхности (водоем, лес, почва) попадают в пиксель спутникового радиометра, размеры которого меньше его разрешения. В отличие от других аналогичных показателей, RMSDI качественно оценивает засуху с учетом диэлектрических свойств конкретных почв. Надежное использование RMSDI зависит от точности определения зависимостей n(W), к(W), χ(W), χ_t, W_t.

Преимуществом RMSDI является простота использования: 1) RMSDI рассчитывается на основе имеющихся данных SMOS и MODIS; 2) Оценка входных параметров χ_0, χ_t, χ_w возможна на основе стандартного определения ρ_{cyx}, W_t; 3) Значения χ_w для разных почв близки в пределах погрешности.

Сезонный анализ интенсивности и продолжительности засух с использованием RMSDI возможен при накоплении спутниковых данных за период исследования (суточные данные не являются строго необходимыми).

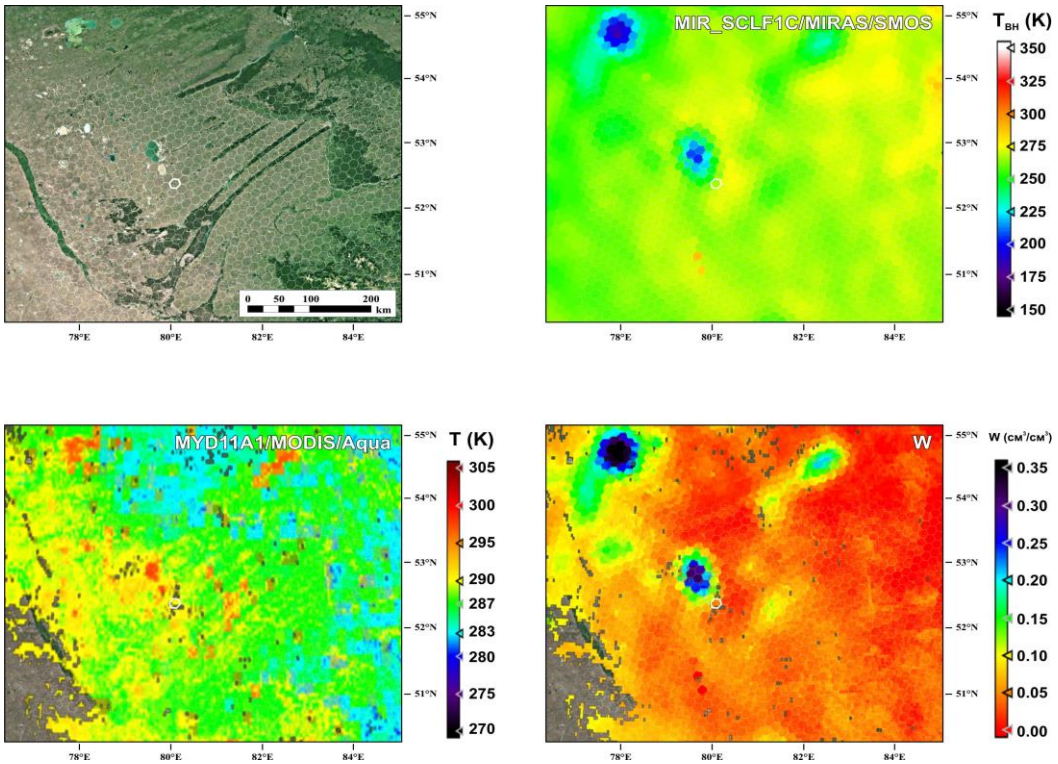


Рис. 18. Карты-схемы пространственного распределения $W(\chi)$, построенные с использованием дистанционных измерений $T_{Я}$ в микроволновом диапазоне, T в инфракрасном диапазоне позволяют выявить малоувлажненные территории

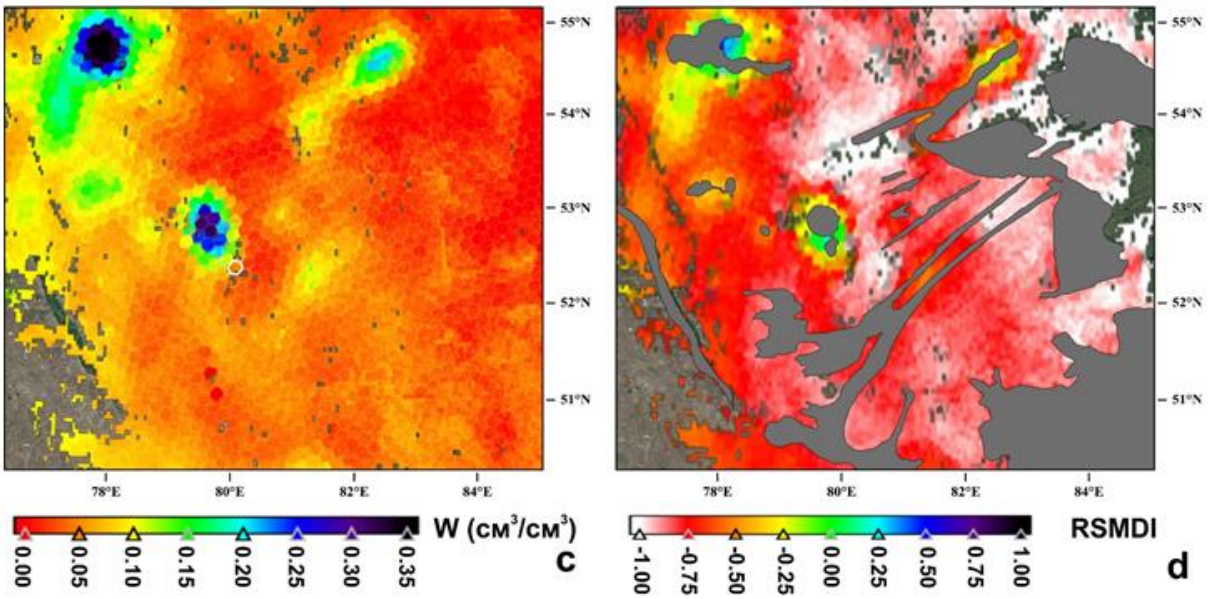


Рис. 19. Карта-схема пространственного распределения объемной влажности (W) и дистанционного микроволнового индекса засухи (RMSDI) по состоянию на 26.07.2012

Выводы по главе 3

В третьей главе диссертации приведены основные научные результаты диссертации, в том числе:

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 детектировать смену состояний (открытая вода, ледообразование, ледостав, таяние) (Callaghan et.al., 2026; Романов и др., 2023; Рябинин и др., 2023).

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 (Рябинин и др., 2023; Рябинин и др., 2024).

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 (Romanov et al., 2023).

4. Впервые построена карта-схема пространственного распределения дистанционного индекса, характеризующая масштабы почвенной засухи на территории Алтайского края (Romanov et al., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 зависимости $T_{Я}(D)$ 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов В. А., Дурнев Р. А., Соколов Ю. И. Опасные гидрометеорологические явления на территории России: Научно-популярное издание // ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). Москва, 2009. 316 с.
2. Алиева С.С. Разработка универсального комбинированного индекса засухи и влажности почвы // Вестник КрасГАУ. 2017. № 8 (131). С. 136-141.
3. Виноградова В.В., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А. Динамика увлажнения и теплообеспеченности в переходных ландшафтных зонах по спутниковым и метеорологическим данным в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 162-172.
4. Владимиров А. М. Классификация гидрологических засух // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2012. № 23. С. 5-12.
5. Владимиров А.М., Малышева Н.Г. Оценка вероятности появления гидрологической засухи // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2012. № 24. С. 5-17.
6. Галахов В.П. Условия формирования поверхностного стока в бассейне Кулундинского озера //Известия Алтайского государственного университета. 2003. № 3 (29). С. 071-078.
7. Добровольский С.Г. Засухи мира и их эволюция во времени: сельскохозяйственный, метеорологический и гидрологический аспекты // Водные ресурсы. 2015. т. 42. № 2. с. 119.
8. Дунаева Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Ёлкина Е.С., Барботкина Е.С., Вечерков В.В., Барталев С.А. Использование данных дистанционного зондирования для ранней диагностики наступления засушливых условий // Таврический вестник аграрной науки. 2019, №4 (20) С. 28-45.

9. Задорнова О.И. Сравнительная характеристика зарубежных индексов оценки засух по основным зерносеющим субъектам европейской территории России // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2015. № 578. С. 126-139.
10. Зверев А.Т., Фисенко Е.В. Современные методы определения засушливых земель по космическим снимкам // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 3. С. 53-63.
11. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Спутниковый индекс климатических экстремумов засушливых земель / Аридные экосистемы. 2012. Т. 18, № 4 (53), с. 5-12.
12. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Спутниковый индекс климатических экстремумов засушливых ландшафтов SCEI //В книге: Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Монография. В 5- ти томах. Москва, 2018. С. 229-232.
13. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Виноградова В.В. Спутниковый индекс для оценки климатических экстремумов на засушливых землях (на примере Кумо-Манычской впадины) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №1. С. 114-121.
14. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Роль весенне-летних засух в динамике аридизации засушливых земель европейской территории России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 1. С. 98-108.
15. Илякова Р.М., Долгих С.А. Анализ повторяемости почвенной засухи на основе индекса Палмера // Гидрометеорология и экология. 2011. № 3 (62). С. 50-65.
16. Исследовательский центр MODIS URL: https://modis.gsfc.nasa.gov/ (дата обращения 10.10.2021)

17. Комаров С. А., Миронов В. Л., Романов А. Н. Аэрокосмическое зондирование гидрологического состояния почв радиофизическими методами. Барнаул: Изд-во АГУ, 1997. 104 с.
18. Костяной А.Г., Лебедев С.А., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М. Спутниковый мониторинг вод Туркменистана // Девятая открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. 14-18 ноября 2011 г.
19. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий — Москва. ИКИ РАН. 2016.— 334 с.
20. Лебедева (Верба) М.П., Лопухина О.В., Калинина Н.В. Особенности химико-минералогического состава солей в соровых солончаках и озерах Кулундинской степи // Почвоведение. 2008. № 4. С. 467-480.
21. Литвинова О.С. Влияние макроциркуляционных условии на атмосферное увлажнение юга и юго-востока Западной Сибири // Географический вестник. 2020. № 2 (53). С. 100-110. 0 70.
22. Салмин А.С., Асауляк И.Ф., Белолюбцев А.И. Анализ временных рядов стандартизированного индекса осадков (SPI) // Успехи современного естествознания. 2021. № 5. С. 101-109.
23. Лукерина, Г. В., Лукерин А.Ю. Динамика площади озера Кулундинское Алтайского края по спутниковым данным // Современное состояние водных биоресуров и аквакультуры: Материалы научно-практической VII международной конференции. Новосибирск: ИЦ НГАУ. 2024. С. 87-93.
24. Магрицкий Д. В. Опасные гидрологические явления и процессы в устьях рек: вопросы терминологии и классификации // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2016. № 2. С. 35-61.
25. Максимов А. А. Комплексный мониторинг ледовых условий в каспийском море на основе спутниковых данных: специальность 25.00.30 «Метеорология, климатология, агрометеорология»: диссертация на соискание

ученой степени кандидата географических наук / Максимов Артем Алексеевич. 2022. 150 с.

26. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для вузов. М.: Высшая школа. 2007. 463 с.
27. Постановление Госстандарта России от 16 апреля 1998 г. № 122 ГОСТ 22.0.03-97. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200001518 (дата обращения 17.10.2022)
28. Постановление Правительства РФ от 18 сентября 2019 г. N 1203-47 URL: https://base.garant.ru/72767122/ (дата обращения 05.09.2021)
29. Перечень и критерии опасных природных явлений, действующие на территории деятельности ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». URL: http://meteo-nso.ru/pages/115 (дата обращения 18.10.2022)
30. Романов А.Н., Рябинин И.В., Хвостов И.В., Трошкин Д.Н., Романов Д.А. Оценка почвенной засухи на юге Западной Сибири по данным спутника SMOS // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН. 2022. С. 330.
31. Рахмуни А., Медди М., Хамуди Сааед А. Влияние метеорологической засухи и характеристик бассейна на проявления гидрологической засухи на северо-западе Алжира // Метеорология и гидрология. 2022. № 9. С. 94-107.
32. РД 52.04.563-2002 «Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения». URL: https://docs.cntd.ru/document/1200034751 (дата обращения 18.10.2022)
33. Романов А.Н., Плуталова Т.Г., Романов Д.А., Рябинин И.В., Трошкин Д.Н., Хвостов И.В. К разработке дистанционных микроволновых индикаторов состояния леса // Материалы 21-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. 2023.

34. Романов А. Н., Рябинин И. В., Хвостов И. В., Романов Д. А. Анализ гидрологических изменений минеральных озёр в Северной Евразии по данным спутника SMOS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 6. С. 222-233.
35. Романов А.Н., Ермаков Д.М., Тихонов В.В., Пашинов Е.В., Плуталова Т.Г., Хвостов И.В., Романов Д.А., Рябинин И.В., Евтюшкин А.В. Технологии дистанционного мониторинга засух / Барнаул. Алтайский государственный университет. 2024. 148 с.
36. Романов А.Н., Трошкин Д.Н., Хвостов И.В., Рябинин И.В., Романов Д.А. Дистанционные радиофизические предвестники засух в аграрном регионе России (на примере Алтайского края) // Степи Северной Евразии. Материалы X международного симпозиума (Международного степного форума). Оренбург. Институт степи УрО РАН. 2024. С. 1105-1112.
37. Романов А. Н., И. В. Рябинин, И. В. Хвостов, В. В. Тихонов Анализ современных гидрологических изменений в Арктике по данным спутника SMOS (на примере Карского моря) // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. 2022. С. 494.
38. Романов А.Н., Хвостов И.В., Трошкин Д.Н., Рябинин И.В., Романов Д.А. Некоторые аспекты дистанционного микроволнового мониторинга леса // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы X Международной научной конференции. Красноярск. Сибирский федеральный университет, 2023. С. 285-288.
39. Романов А.Н., Хвостов И.В., Рябинин И.В., Романов Д.А., Трошкин Д.Н. Дистанционные микроволновые индикаторы сухости леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 1. С. 197-209.

40. Романов А.Н., Хвостов И.В., Рябинин И.В., Тихонов В.В., Шадуйко О.М. Связь сезонных вариаций радиояркостных температур акватории Карского моря с гидролого-климатическими изменениями в Арктике // Известия вузов. Физика. 2023. Т. 66, № 4(785). С. 34-47.
41. Романов А.Н., Хвостов И.В., Рябинин И.В., Тихонов В.В., Шарков Е.А. Сезонная и межгодовая динамика радиояркостных температур акваторий восточных морей Северного Ледовитого океана // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. 2021. С. 438.
42. Романов А. Н., Хвостов И. В., Рябинин И. В., Романов Д. А. Дистанционная оценка влагозапаса почвы в метровом слое по данным спутника SMOS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 4. С. 209-222.
43. Романов А. Н., Хвостов И. В., Рябинин И. В., Романов Д. А. К оценке влагозапаса почвы в метровом слое по данным дистанционного микроволнового зондирования // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы XI Международной научной конференции. Красноярск. Сибирский федеральный университет. 2024. С. 124-127.
44. Романов А. Н., И. В. Хвостов, И. В. Рябинин, Д. А. Романов К разработке дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи (на примере сезонного усыхания гипергалинного озера) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 6. С. 222-233.
45. Романов А. Н., Хвостов И. В., Рябинин И. В. Анализ экологического состояния подстилающей поверхности песчано-солончаковой пустыни Аралкум по ежедневным данным спутника SMOS // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. 2021. С. 377.
46. Романов А. Н., Хвостов И. В., Рябинин И. В., Романов Д. А. Дистанционные микроволновые предвестники почвенной засухи // Материалы 22-й

Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН, 2024. С. 203.

47. Романов Д. А., Рябинин И. В., Романов А. Н. Сезонные изменения температуры в стволе живого дерева (на примере сосны) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 2. С. 142-154.
48. Романов А. Н., Хвостов И. В., Рябинин И. В. К разработке дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва: ИКИ РАН. 2023. С. 44.
49. Романов Д. А., Рябинин И.В. Некоторые особенности сезонных вариаций температуры в штамбе дерева // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы IX Международной научной конференции. Красноярск. Сибирский федеральный университет. 2022. С. 135-138.
50. Рочева Э.В. Возможные предвестники засух в сельскохозяйственных районах России // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 5-18.
51. Рябинин И. В., Романов А. Н., Хвостов И. В., Тихонов В. В. О взаимовлиянии гидрологических изменений в арктических и внутриконтинентальных регионах Северной Евразии // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. 2023. С. 245.
52. Рябинин И.В., Романов Д.А., Хвостов И.В., Трошкин Д.Н., Романов А.Н. Некоторые результаты дистанционного микроволнового мониторинга засух на юге Западной Сибири // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы IX Международной научной конференции. Красноярск. Сибирский федеральный университет. 2022. С. 33-36.
53. Рябинин И.В., Хвостов И.В., Романов А.Н. Оценка гидрологической засухи на юге Западной Сибири по данным спутника SMOS // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. 2022. С. 331.

54. Степаненко В.М., Репина И.А., Ганбат Г., Даваа Г. Моделирование ледового режима соленых озер // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 152–163.
55. Страшная А.И., Тищенко В.А., Береза (Чуб) О.В., Богомолова Н.А. О возможности использования стандартизированного индекса осадков для выявления засух и в прогнозах количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. № 357. С. 81-97.
56. Трошкин Д. Н., Рябинин И. В., Хвостов И. В., Романов А. Н. Моделирование характеристик сельскохозяйственной засухи на основе распределения Гаусса // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН. 2022. С. 343.
57. Хвостов И. В., Рябинин И. В., Романов А. Н. Сравнительный анализ спутниковых и контактных измерений влажности почвы в условиях засухи и почвенного засоления // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. 2022. С. 345.
58. Черенкова Е. А., Золотокрылин А. Н. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 2. С. 79-94.
59. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: Физические основы 1 том. М. ИКИ РАН. 2014. 544 с.
60. Щербенко Е.В. Дистанционные методы выявления сельскохозяйственной засухи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Том 4. № 2. 2007. Стр. 408-419
61. AghaKouchak A., et al. Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities // Rev. Geophys. 2015. Vol. 53. Pp. 452–480.

62. Anderson M.R., Crane R.G., Barry R.G. Characteristics of arctic ocean ice determined from SMMR data for 1979: Case studies in the seasonal sea ice zone//Advances in Space Research. Volume 5. Issue 6. 1985. Pages 257-261
63. Ayzel, G.; Izhitskiy, A. Climate Change Impact Assessment on Freshwater Inflow into the Small Aral Sea. Water. 2019. 11. 2377.
64. Arturo A. Keller, Kendra Garner, Nalini Rao, Eladio Knipping, Jeffrey Thomas Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale: A critical review of existing hydrologic and water quality models//Science of The Total Environment. Volume 867. 2023. 161209
65. Ashok K. Mishra, Vijay P. Singh, A Review of drought concepts. Journal of Hydrology. Volume 391. Issues 1–2. 2010. Pages 202-216
66. Bingfang Wu, Zonghan Ma, Nana Yan Agricultural drought mitigating indices derived from the changes in drought characteristics //Remote Sensing of Environment (IF10.164). 2020
67. Breckle SW., Wucherer W., Dimeyeva L., Ogar N. (eds), Aralkum - a Man-Made Desert. Ecological Studies (Analysis and Synthesis). vol 218. 16 August 2011.
68. Callaghan T.V., Romanov A.N., Khvostov I.V., Ryabinin I.V., Tikhonov V.V., Shaduyko O.M. Atmospheric and Hydrospheric Characteristics in Contrasting Arctic and Intracontinental Regions of Northern Eurasia and Possible Mutual Influences // Water. 2026. 18. 251.
69. Chunhong Z., Xiaochun Z., Jian Z., Xiaoye Z. Representations of dynamics size distributions of mineral dust over East Asia by a regional sand and dust storm model // Atmospheric Research. 250. 105403
70. Chattopadhyay N., Malathi K., Tidke,N. et al. Monitoring agricultural drought using combined drought index in India // J Earth Syst Sci 129. 155 (2020).
71. Gerhards M., et al. Challenges and Future Perspectives of Multi-/Hyperspectral Thermal Infrared Remote Sensing for Crop Water-Stress Detection: A Review //Remote Sensing. 2019. Vol. 11(10). Article 1240.

72. Gorji T., Sertel E., Tanik A. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey // Ecological Indicators. 2017. Vol. 74. pp. 384-391.
73. Hao Z., AghaKouchak A., Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model //Advances in Water Resources 2013. Vol. 57. P. 12-18.
74. Makkaveev P.N., Gordeev V.V., Zav'yalov P.O. et al. Hydrochemical Characteristics of the Aral Sea in 2012–2013. Water Resour 45. 188–198 (2018).
75. Indoitu R., Kozhoridze G., Batyrbaeva M., Vitkovskaya I., Orlovsky N., Blumberg D., Orlovsky L. Dust emission and environmental changes in the dried bottom of the Aral Sea. Aeo-lian research. vol. 17. pp. 101-115. Jun. 2015.
76. Issanova G., Abuduwaili J., Galayeva O. et al. Aeolian transportation of sand and dust in the Aral Sea region // International journal of environmental science and technology. vol. 12. no. 10. pp. 3213–3224. Oct. 2015.
77. Jiao Wenzhe, Wang Lixin, Novick Kimberly A. et al. A new station-enabled multi-sensor integrated index for drought monitoring // Journal of hydrology. Vol. 574. Pp.169-180. Jul.2019.
78. Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2009. 75(11). 1307-1317.
79. Kamilli K.A., Ofner J., Krause T., Sattler T., Schmitt-Kopplin P., Eitenberger E. Friedbacher G., Lendl B., Lohninger H., Schöler H.F., Held A. Ow salt lakes affect atmospheric new particle formation: A case study in Western Australia // Science of The Total Environment. 2016. Vol. 573. pp. 985-995.
80. Le M., Page M., Zribi M. Analysis and predictability of drought in Northwest Africa using optical and microwave satellite remote sensing products // Scientific reports. 2019. Vol. 9. Article 1466.
81. Li Z., Han Y., Hao T. Assessing the Consistency of Remotely Sensed Multiple Drought Indices for Monitoring Drought Phenomena in Continental China //

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. vol. 58. no. 8. pp. 5490-5502. Aug. 2020.

82. Lilin Zhang, et al. Assessing the Remotely Sensed Evaporative Drought Index for Drought Monitoring over Northeast China // Remote Sens. 201. 11(17). 1960
83. Liu L., Liao J., Chen X., et al. The Microwave Temperature Vegetation Drought Index (MTVDI) based on AMSR-E brightness temperatures for long-term drought assessment across China (2003-2010) // Remote sensing of environment. 2017. Vol. 199. Pp. 302-320.
84. Löw F., Navratil P., Kotte K., Schöler H. F., Bubenzer O. Remote-sensing-based analysis of landscape change in the desiccated seabed of the Aral Sea—a potential tool for assessing the hazard degree of dust and salt storms // Environmental monitoring and assessment. vol. 185. no.10. pp. 8303–8319. Oct. 2013.
85. Ma Shengfang, Zhou Yuting, Gowda Prasanna H., et al. Application of the water-related spectral reflectance indices: A review // Ecological indicator. Volume 98. P. 68-79. 2019.
86. Massakbayeva A. et al. Water balance of the Small Aral Sea // Environmental earth sciences. vol. 79. № 75. Jan. 29. 2020
87. Moore J.N. Recent desiccation of Western Great Basin Saline Lakes: Lessons from Lake Abert, Oregon, USA // Science of The Total Environment. 2016. Vol. 554–555. pp. 142–154.
88. Mukherjee S., Mishra A., Trenberth K. E. Climate change and drought: A perspective on drought indices // Current Climate Change Reports. 4. 145-163. 2018
89. Olmedo E., Martínez J., Umbert M., Hoareau N., Portabella M., Ballabrera-Poy J., Turiel A. Improving time and space resolution of SMOS salinity maps using multifractal fusion // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 180. pp. 246-263.

90. Panciera R., Walker J.P., Kalma J. et al. A proposed extension to the soil moisture and ocean salinity level 2 algorithm for mixed forest and moderate vegetation pixels // Remote Sensing of Environment. Vol. 115. no. 12. 15. pp. 3343-3354. December 2011.
91. Poursanidis D., Chrysoulakis N. Remote Sensing, natural hazards and the contribution of ESA Sentinels missions // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2017. Vol. 6. Pp. 25-38.
92. Quemada C., et al. Remote Sensing for Plant Water Content Monitoring: A Review // Remote Sensing. 2021. Vol. 13(11). Article 2088. 2021
93. Radio Regulations, Edition of 2024. URL: https://www.itu.int/pub/R-REG-RR (дата обращения 05.12.2021)
94. Rao K., Anderegg W.R.L., Sala A., Martínez-Vilalta J. Satellite-based vegetation optical depth as an indicator of drought-driven tree mortality // Remote sensing of environment. 2019. Vol. 227. Pp.125-136.
95. Romanov A.N., Khvostov I.V., Ryabinin I.V., Troshkin D.N., Romanov D.A. Remote Microwave Soil Drought Index Considering Dielectric Properties of Soil // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2023a. Vol. 61. P. 4408208.
96. Romanov A.N., Khvostov I.V., Ryabinin I.V., Romanov D.A. Romanov Analysis of Hydrological Changes in Mineral Lakes in Northern Eurasia Based on SMOS Satellite Data // Cosmic Research. 2023b. Vol. 61. No. S1. P. S80-S88.
97. Romanov A.N. Dielectric Behavior of Sodic Solonchak at 1.41 GHz in the South of Western Siberia // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2019. Т. 57. № 12. С. 9517-9523.
98. Romanov A. N., Khvostov I. V. Microwave Remote Monitoring of Altai Catastrophic Flood Dynamics Using SMOS Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. vol. 12. no. 10. pp. 2036-2040. Oct. 2015
99. Romanov A.N., Khvostov I.V., Sukovatova A.Yu. Seasonal variations of microwave radiation of saline soils in the Kulunda stepped on evidence derived

from SMOS // Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). 2017. pp. 3025-3031.

100. Romanov A.N., Ryabinin I.V., Khvostov I.V., Troshkin D.M., Romanov D.A. Remote Radio-Physical Harbingers of Drought in Steppes of the South of Western Siberia // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, No. 23. P. 6141.
101. Saavedra P., Simmer C. An Octave/MATLAB® Interface for Rapid Processing of SMOS L1C Full Polarization Brightness Temperature // Journal of Open Research Software. 6(1). p. 2. 2018
102. Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic Discrete Global Grid Systems // Cartography and Geographic Information Science. 2003. V. 30. № 2. P. 121-134.
103. Sharma A., Huang H.P., Zavialov P., Khan V. Impact of Desiccation of Aral Sea on the Regional Climate of Central Asia Using WRF Model // Pure and applied geophysics. 2018. Vol. 175. N 1. P. 465-478
104. Singh A., Behrangi A., Fisher J.B., Reager J.T. On the Desiccation of the South Aral Sea Observed from Spaceborne Missions // Remote sensing. 2018. Vol. 10. N. 5.
105. Sun Fangdi, Ronghua Ma. Hydrologic chencles of Aral Sea: A reveal by the combination of radar altimeter data and optical images", Annals of GIS, 2019. vol. 25. № 3. pp. 247-261.
106. Talone M., Sabia R., Camps A., Vall-llossera M., Gabarró C., Font J. Sea surface salinity retrievals from HUT-2D L-band radiometric measurements // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. N 8. pp.1756-1764.
107. Tian M., Wang Z., Yu K., et al. Study on the Precipitation Temperature Index and its application in drought and flood disasters // 6th International Conference on Agro-Geoinformatics Местоположение. Fairfax. 2017. p. 290-293.
108. Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Ivanov V.V., Boyarskii D.A., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu. A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // Advances in Space Research. 2015. V. 56(8). P. 1578-1589.

109. The Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). URL: https://lpdaac.usgs.gov (дата обращения 18.11.2022)
110. Waiser M.J., Waiser R.D. Waiser Saline Inland Waters // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, from Encyclopedia of Inland Waters. 2009. pp. 634-644.
111. Wan Z. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Background Document (LST ATBD). Washington: National Aeronautics and Space U.S. Department of Commerce. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf (дата обращения 04.09.2021)
112. Wang J., Guo N., Ma C. The dynamic variation characteristics of Gahai Lake area based on EOS-MODIS data // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2012. pp. 768-771.
113. Wang Z.D., Guo P., and Wan H. Improved drought monitoring method based on multisource remote sensing data // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2020. pp.5282-5285.
114. Wei W., Zhang J., Zhou L., Xie B., Zhou J., Li C. Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data // Environ Sci. Pollut. 2021. Res 28. 20408–20425.
115. Wen W., Timmermans J., Chen Q., van Bodegom P.M. A Review of Remote Sensing Challenges for Food Security with Respect to Salinity and Drought Threats // Remote Sens. 2021. 13. 6.
116. Wenzhe J., Chao T., Qing C., et al. A new multi-sensor integrated index for drought monitoring // Agricultural and forest meteorology. 2019. Vol. 268. Pp. 74-85.
117. SMOS L1 and L2 Science data URL: https://earth.esa.int/eogateway/catalog/smos-science-products (дата обращения 01.09.2021)
118. SMOS Toolbox for SNAP (SMOS-Box). URL: https://earth.esa.int/eogateway/tools/smos-toolbox (дата обращения 18.11.2022)

119. Svoboda M., Fuchs B.A. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP). Handbook of Drought Indicators and Indices. Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva. 2016.
120. Wuyungaowa Yinshan, Yuhai Bao, Yongfang Wan. The Establishment and Application of Microwave Drought Index in Xilingo League // Information technology for risk analysis and crisis response. Book Series Advances in Intelligent Systems Research Vol. 102. Pp. 512-516. 2014.
121. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. 27(14). 3025–3033.
122. Xuan Zhang et. al. Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors // Science of The Total Environment. Volume 838. Part 2. 2022.
123. Yan L., Zheng M. Influence of climate change on saline lakes of the Tibet Plateau, 1973–2010 // Geomorphology. 2015. Vol. 246. pp. 68-78.
124. Yang J., Chang J., Wang Y., Yao J. Comprehensive drought characteristics analysis based on a nonlinear multivariate drought index // Journal of Hydrology. 557. Pp.651-667. Dec. 2017.
125. Yihdego Y., Vaheddoost B., Al-Weshah R.A. Drought indices and indicators revisited // Arab J Geosci. 2019. 12. 69.
126. Yilmaz B. Proposed index for drought assessment: modified reconnaissance drought index (mRDI) // Journal of Environmental Protection and Ecology 19(4). 1796-1804. December 2018
127. Zhang H.W., Chen H.L. The Review of Drought Index in Advance // International Conference on Ecological Protection of Lakes-Wetlands-Watershed and Application of 3S Technology (EPLWW3S 2011) 2011. Vol. 2. Pp.533-537
128. Zhang L., Wenzhe J., Zhang H., et al. Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices // Remote sensing of environment. 2017. Vol. 190. Pp. 96-106.