

*На правах рукописи*



**Кривальцевич Сергей Викторович**

**ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ  
ДЕГРАДИРОВАННЫХ ПОЧВ**

25.00.35 – геоинформатика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Барнаул – 2005

Работа выполнена в Омском государственном педагогическом университете  
на кафедре общей физики физического факультета

Научные руководители      доктор физико-математических наук, профессор  
**Бобров Павел Петрович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
**Поляков Виктор Владимирович**

кандидат физико-математических наук,  
доктор технических наук, доцент  
**Романов Андрей Николаевич**

Ведущая организация    Институт космических исследований РАН, г. Москва.

Защита диссертации состоится « 23 » декабря 2005 г. в 12 часов на заседании Диссертационного совета Д 212.005.04 при Алтайском государственном университете по адресу: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АГУ по адресу: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

Автореферат разослан      « 22 » ноября 2005 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н., профессор



С.А. Безносюк

2006-4  
25888

22А3363

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В настоящее время серьезную экологическую проблему представляет деградация почв, основными причинами которой являются их загрязнение, засоление и дегумификация. Значительная часть поверхности суши вовлечена в хозяйственную деятельность человека, что зачастую приводит к губельным для экосистем последствиям.

Любая механическая обработка почв, особенно проводимая с технологическими нарушениями, приводит к разрушению и распылению макроагрегатов. Вследствие этого, снижается водопроницаемость, усиливается эрозия, уменьшается содержание гумуса. При быстром снеготаянии и осадках может происходить переувлажнение почвы и поверхностный сток, и смыв верхних, плодородных слоёв. Большую экологическую проблему представляет загрязнение почв нефтепродуктами и зольными выбросами ТЭЦ. Своевременное обнаружение зон деградации и загрязнений позволит принять необходимые меры и приостановить деструктивные процессы.

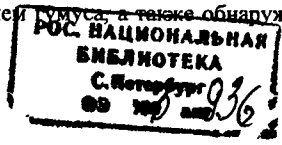
Для проведения контроля за состоянием почвы и создания баз данных геоинформационных систем (ГИС) наиболее приемлемым и экономически выгодным решением является использование технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Современный уровень развития космических и наземных средств позволяет получать снимки конкретного участка два и более раз в сутки, а современные вычислительные возможности обеспечивают высокую оперативность обработки. Применение много- и гиперспектральных комплексов, состоящих из радиометров, радиолокаторов и оптических сканеров, позволяет расширить возможности интерпретации полученных изображений.

Основными преимуществами применения в исследовании почв дистанционного микроволнового метода являются всепогодность, возможность получения информации в любое время суток и о некотором слое исследуемой поверхности.

Поскольку основным фактором, влияющим на радиотепловое излучение и обратное рассеяние, является содержание почвенной влаги, любые изменения, происходящие в почве при её деградации, могут быть обнаружены, если при этом изменяется водно-воздушный режим почвы. Так, в [1] показано, что засоление и дегумификация приводят к изменению характера динамики радиояркостной температуры в процессе испарения почвенной влаги, что может служить новым информационным признаком в технологии ДЗЗ.

Преимуществом применения инфракрасного и оптического диапазонов является их высокая разрешающая способность. Космические снимки используются для выявления лесных пожаров, зон почвенной эрозии, ореолов загрязнения вокруг крупных городов по зимним снимкам и т.п.

Проведенные нами исследования показали возможность дистанционной оценки структуры почвы, обусловленной содержанием гумуса, а также обнаружения дистанци-



онными методами некоторых видов загрязнений: загрязнение почв зольными выбросами ТЭЦ, загрязнение почв нефтепродуктами, влияние воздействия зольных и пылевых выбросов ТЭЦ и промышленных предприятий на динамику вегетационного индекса

**Объектом исследования** является динамика излучательных характеристик почв с различным содержанием органических веществ и различными загрязнениями, а также влияние зольных загрязнений на динамику вегетационного индекса в загрязненных зонах.

**Цель исследования** – определение условий наблюдений, при которых возможно выявление зон дегумификации и загрязнения микроволновым и оптическим методами

**Задачи, решенные в процессе работы:**

- исследована динамика коэффициента излучения почв с различным содержанием гумуса на 3-х частотах дециметрового и сантиметрового диапазона волн;
- исследована динамика коэффициента излучения почв в микроволновом диапазоне, загрязненных зольными веществами и нефтепродуктами;
- исследована возможность выявления территорий, загрязненных зольными и пылевыми выбросами, с помощью космических снимков оптического и ИК диапазонов

**Научная новизна** результатов, полученных в диссертационном исследовании, заключается в следующем:

- впервые указана возможность и определены условия наблюдений для оценки структуры почвы на основании однократных измерений радиояркостной температуры на двух длинах волн 11 и 3,6 см;
- впервые установлено влияние загрязнений почв зольными выбросами и нефтепродуктами на динамику радиотеплового излучения в микроволновом диапазоне и указана возможность обнаружения загрязненных участков по измерениям радиояркостной температуры на двух длинах волн 11 и 3,6 см;
- впервые установлено влияние зольных и пылевых загрязнений почв на динамику вегетационных индексов лесного покрова.

**Положения, выносимые на защиту:**

- временные зависимости радиояркостной температуры почв с различным содержанием гумуса и некоторых типов загрязнителей, в процессе испарения почвенной влаги;
- наличие условий, при которых возможна оценка структуры почвы, обусловленная различным содержанием гумуса, по данным однократных измерений радиояркостной температуры на двух длинах волн 11 и 3,6 см – через 1 - 2 суток после интенсивного увлажнения;
- различия во временной динамике коэффициента излучения фоновых и загрязненных зольными выбросами ТЭЦ почв, проявляющиеся в основном на песчаных почвах;

– различия во временной динамике коэффициента излучения фоновых и загрязненных нефтепродуктами почв, обусловленные значительным изменением гидрофизических свойств при загрязнении;

– возможность использования космических снимков ИК и оптического диапазона для определения загрязнения территорий зольными выбросами, используя их влияние на динамику вегетационных индексов растительности.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается совпадением отдельных полученных результатов с данными других исследователей, строгим учётом погрешности измерений, согласием расчетных и измеренных значений.

**Практическая ценность работы.** Результаты исследования могут быть использованы для создания баз данных деградируемых почв в ГИС системах. Также полученные данные могут быть использованы в развитии методов и технологий ДЗЗ, для оценки качества почв по их водно-воздушному режиму; для оценки качества рекультивации почв, загрязненных нефтепродуктами; для выявления ореолов загрязнения почв вокруг золотвалов и других источников промышленного загрязнения. Результаты, полученные микроволновым радиометрическим методом, могут быть использованы для развития радиолокационных методов исследования почв.

**Апробация работы.** Основные результаты работ, составляющих содержание диссертации, обсуждались на конференциях всероссийского и международного уровня, таких как: XX всероссийская конференция по распространению радиоволн (Н. Новгород 2002), Всероссийская конференция «Дистанционное зондирование поверхности земли и атмосферы» (Иркутск 2003), Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва 2003), Вторая Всероссийская научная конференция «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами» (Санкт-Петербург 2004), Вторая открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва 2004), Одиннадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных. (Екатеринбург 2005), 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment (Saint Peterburg, 2005) International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'05) (Seoul, Korea, 2005), 11-я Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (СИБРЕСУРС-11-2005) (Барнаул, 2005г.), а также на научных семинарах совместной лаборатории микроволновой радиометрии Земли ОмГПУ и КНЦ СО РАН (2003, 2004, 2005).

**Публикации:** по теме диссертации опубликовано 20 печатных и рукописных работ, список основных работ приведен в конце автореферата.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы из 130 наименований и приложения. Объем диссертации составляет

162 страницы, включая 36 рисунков и 14 таблиц цитируемых источников 130 наименований; объем приложения – 19 страниц

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, проводится анализ состояния исследований по изучаемой проблеме, формулируются цели и задачи исследования. Оценены научная новизна полученных результатов и их практическая значимость. Обозначены основные положения диссертации, выносимые на защиту. Дана общая характеристика работы.

В первой главе диссертации «Дистанционное исследование свойств почв» приводится обзор литературы по гидрофизическим характеристикам почв и влияния на них загрязнений; по диэлектрическим и излучательным характеристикам почв в микроволновом диапазоне с учётом влияния загрязнений; по известным методикам выявления зон загрязнения с помощью обработки космических снимков видимого и ИК диапазона. В разделе 1.1 рассмотрены гидрофизические характеристики различных типов почв и влияние на них нефтяных и зольных загрязнений, а также содержания гумуса и растворимых солей. В разделе 1.2 дано описание основных моделей комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) естественных почвогрунтов. Приведены литературные данные о влиянии на КДП почв гранулометрического состава, содержания гумуса, солей и различных загрязнений [2, 3]. Раздел 1.3 посвящен анализу моделей излучения почв. Также в разделе приведены литературные данные о состоянии современных знаний по моделированию динамики радиояркостной температуры и возможности определения различных гидрофизических характеристик почв и уровня грунтовых вод. Рассмотрено состояние проблемы влияния засоления и дегумификации на спектральные характеристики почвы в оптическом диапазоне. Раздел 1.4 посвящен литературному обзору известных методик выявления зон загрязнения по результатам обработки многоспектральных космических снимков. В разделе 1.5 на основании литературного обзора ставятся задачи исследования.

Во второй главе «Методика проведения эксперимента» приводится описание экспериментальной установки, методика проведения радиометрических измерений, произ-

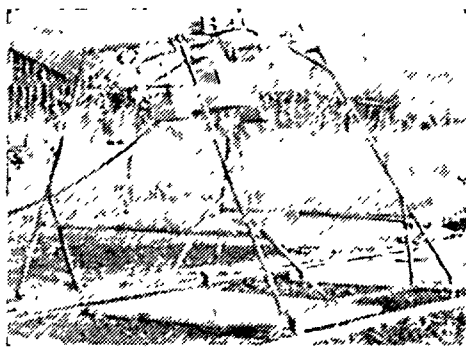


Рис 1. Внешний вид экспериментальной установки

ведена оценка погрешности измерений, а также описана методика обработки космических снимков.

В разделе 2.1. приведено описание экспериментальной установки и исследуемых участков. На рисунке 1 показана часть радиометрического комплекса, разработанного в ОмГПУ, на базе которого было выполнено данное исследование. Измерялось восходящее радиотепловое излучение под углом  $10^0$  от зенита на горизонтальной поляризации на длинах волн 3,6, 5, 11 см и в отдельных экспериментах на длине волны 15 см.

В разделе 2.2 дано описание методики проведения радиометрических измерений, применяемой при исследовании характеристик различных почвогрунтов. Проведен анализ погрешности измерений. Порог флуктуационной чувствительности составлял 0,5 К при времени накопления  $\tau=1$  с для радиометров на длине волн  $\lambda=3,6$ ,  $\lambda=11$  и  $\lambda=15$  см, и 1 К при  $\tau=16$  с для измерителя ПК7-20 на  $\lambda=5$  см. Погрешность абсолютной калибровки при этом составила 1,5-2,5 К на всех длинах волн.

Каждый цикл начинался после искусственного орошения или выпадения естественных осадков и заканчивался при достижении влажности верхнего слоя толщиной 0-3 см менее  $0,03 \text{ см}^3/\text{см}^3$ . В процессе проведения измерений радиояркой температуры участков одновременно производились измерения термодинамической температуры на глубине 0,5 см и 1,5 см и периодические (два-три раза в сутки) измерения влажности и плотности верхних слоев 0-1 см, 1-2 см и 2-3 см термостатно-весовым способом.

В разделе 2.3 излагается методика обработки снимков из космоса в ИК и видимом диапазоне. Выбор участков исследования проводился с использованием созданной в процессе исследования базы данных обзорных космических снимков с КА IKONOS по Омской области с разрешением 30-50 метров.

В третьей главе «Исследование динамики радиояркой температуры почв» приведены результаты экспериментального исследования влияния различных видов деградации почвы на её радиояркие характеристики.

В разделе 3.1 изложены результаты исследований влияния дегумификации на радиояркие характеристики почвы в процессе испарения почвенной влаги.

Некоторые свойства почв могут быть оценены по результатам одномоментных измерений на двух длинах волн. Согласно литературным данным при интенсивном испарении в поверхностном слое могут возникнуть градиенты влажности, величина которых зависит от гидрофизических характеристик почвы и её структуры. При этом более высокие градиенты влажности возникают в почве с более высоким содержанием гумуса.

В серии экспериментов, проведенных нами в 2002-2005 годах, были исследованы участки с содержанием гумуса в первом – 0,6%, во втором – 6,6%. Различия в излучении на разных длинах волн оценивались с помощью нормализованной разности радиоярко-

стных температур  $NDT = (T_{\lambda_1} - T_{\lambda_2}) / (T_{\lambda_1} + T_{\lambda_2})$ , где  $T_{\lambda_1}$ ,  $T_{\lambda_2}$  – радиояркостные температуры на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно, причем  $\lambda_1 > \lambda_2$

Так как глубина зондирования на разных длинах волн различна, а в процессе испарения почвенной влаги меняется влажность почвы и её градиент, изменяются также и значения  $NDT$ . С целью определения условий (степень начального увлажнения, метеопараметры атмосферы, время с момента начала испарения), при которых различие в градиентах влажности на разных участках, а, следовательно, и в  $NDT$ , может достигать максимальных значений, необходимо установить его связь с влажностью поверхностного слоя почвы. Прямые измерения влажности почв термостатно-весовым способом с достаточной точностью можно проводить с шагом по глубине не менее 1 см, а коэффициент излучения на используемых длинах волн при сильных градиентах влажности определяется влажностью в более тонком слое. На длине волны 3,6 см глубина зондирования составляет от нескольких миллиметров (при высоких влажностях) до 1-2 см (при низких влажностях)

Регрессионный анализ данных, полученных в разные периоды времени с мая по октябрь 2003-2004 гг. при разных погодных условиях, показывает, что наибольшее различие в значениях  $NDT$  для двух почвенных участков существует при низких значениях яркостных температур (150-180 К), соответствующих высоким значениям влажности почвы – 0,3-0,35 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>. При этом в случае более гладкой поверхности различие в  $NDT$  почвенных участков несколько больше. Следует отметить, что сильные осадки или орошение, после которых и наблюдаются наибольшие различия в  $NDT$ , вызывают разрушение комьев среднего и малого размеров, снижая тем самым шероховатость.

Наибольшее различие в значениях радиояркостной температуры исследуемых участков и в значениях  $NDT$  наблюдалось после таяния снежного покрова. Основная причина такого различия – быстрое высыхание тонкого слоя на поверхности более пористой богатой гумусом почвы. Кроме того, как показано в работе [3], гумус увеличивает долю связанной воды в почве и снижает КДП при средней и высокой влажности. И, наконец, третьей причиной является то, что почва достаточно длительное время находилась в состоянии насыщения влагой, из-за чего почвенные агрегаты на поверхности малогумусной почвы почти полностью разрушились по причине их малой во-

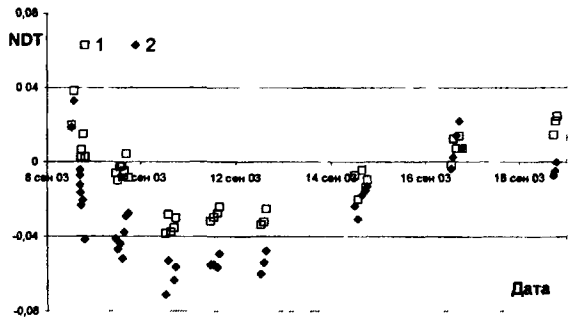


Рис. 2 Изменение нормализованной разности радиояркостных температур ( $NDT$ ) на длинах волн 11 и 3,6 см в эксперименте после орошения участков 1 – участок с малым содержанием гумуса (0,6%); 2 – участок с высоким содержанием гумуса (6,6%)

доустойчивости, а лучше сохранившиеся агрегаты на поверхности почвы с высоким содержанием гумуса образовали шероховатости, увеличивающие коэффициент излучения.

Большие градиенты влажности, вызывающие различие в яркостных температурах на разных длинах волн, возникали также на 1-2-е сутки после сильных осадков или интенсивного орошения. При этом яркостные контрасты, возникающие в процессах увлажнения и испарения почвенной влаги, были меньше. На рисунке 2 приведены значения  $NDT$  в эксперименте, начатом 8 сентября с полива участков слоем воды 18 мм. Влажность поверхностного слоя малогумусной почвы после полива была выше влажности нижележащих слоев из-за низкой влагопроводимости. Положительному градиенту профиля влажности (возрастанию влажности с приближением к поверхности) соответствует положительная величина  $NDT$ . Почва с высоким содержанием гумуса обладает более высокой влагопроводимостью, поэтому сразу после полива установился влажностный профиль с меньшим положительным градиентом, а в результате быстрого высыхания верхнего слоя через сутки установился отрицательный градиент влажности и наибольшая разность  $\Delta NDT = NDT_1 - NDT_2$  между малогумусным ( $NDT_1$ ) и гумусным ( $NDT_2$ ) участками.

Из всей совокупности экспериментальных данных были выбраны такие, когда значения  $\Delta NDT$  были максимальными. Поскольку значения  $NDT$  изменяются в течении суток, в таблице 1 приведены как средние значения за указанный в таблице период наблюдений, так и стандартное отклонение  $\sigma$  этих значений. Средние значения  $\langle NDT \rangle$  больше стандартного отклонения в тех случаях, когда после сильного увлажнения происходило интенсивное испарение. Большие значения  $\sigma$  отражают изменчивость  $NDT$  в течение периода измерений вследствие изменения градиента влажности. Однако разность  $\Delta NDT$  изменяется существенно меньше. Для всех приведенных в таблице периодов измерений, включая и периоды, когда градиенты на участке с малым содержанием были положительными, разность средних значений  $NDT$  составила 0,017-0,027. Максимальные значения  $\Delta NDT$  составляли 0,04-0,05.

Максимальному различию участков в  $NDT$  соответствует и максимальное различие в пористости почв в слое 0-1 см. При этом сами значения  $NDT$  не связаны с общей пористостью. Это свидетельствует о том, что на установление больших градиентов влажности влияет не общая пористость, а доля пор крупных размеров, которая в чернозёмных почвах существенно выше.

С целью определения длин волн радиометров, при использовании которых наиболее отчетливо фиксируются различия в градиентах влажности, нами проведены измерения на длинах волн 3,6 см, 5 см, 11 см и отдельные измерения на длине волны 15 см. Установлено, что оптимальные длины волн радиометров, предназначенных для исследования почвенной структуры, должны выбираться в диапазоне 3-5 см (коротковолновый канал) и 11-15 см (длинноволновый канал). За время проведения измерений наибольшее

различия между *NDT* исследуемых участков было выявлено в середине дня, в течение 1-2-х суток после сильного увлажнения при интенсивном испарении

Таблица 1

Средние значения *NDT* и стандартное отклонение  $\sigma$  в периоды максимального различия значений *NDT* для двух участков в 2003-2005 гг. ( $\lambda_1=11\text{см}$ ,  $\lambda_2=3,6\text{см}$ )

Период наблюдений	Условия	Участок с низким содержанием гумуса (0,6 %)		Участок с высоким содержанием гумуса (6,6 %)	
		<NDT>	$\sigma$	<NDT>	$\sigma$
9-10.05 2003 г.	После таяния снега. Испарение интенсивное	-0,005	0,007	-0,030	0,008
13.06 2003 г.	12 06 несильный, продолжительный дождь. Испарение интенсивное	0,010	0,019	-0,007	0,016
22-24.06 2003 г.	20 06 полив 18 мм, ночь с 20 на 21 06 осадки 4 мм Испарение интенсивное	0,009	0,014	-0,014	0,017
9-12.09 2003 г.	8.09 полив 18 мм 8-9 09 испарение интенсивное, 10-12 09 испарение неинтенсивное	-0,025	0,019	-0,052	0,01
18.09 2003 г.	С 14 на 15 09 осадки 4 мм 15-16 09 испарение неинтенсивное, 17-18 09 испарение интенсивное	0,021	0,005	-0,004	0,004
5.06 2004 г.	4 06 полив 21 мм 5 06 испарение интенсивное	-0,016	0,006	-0,032	0,006
12.07 2004 г.	10-11 07 осадки 55 мм 12 07 испарение интенсивное	-0,007	0,008	-0,025	0,005
23-24.07 2004 г.	22 07 полив 13 мм 23-24.07 испарение интенсивное	-0,029	0,005	-0,036	0,009
27-28.07 2004 г.	26 07 полив 22 мм 27-28 07 испарение интенсивное	-0,003	0,006	-0,022	0,011
2-3.10 2004 г.	29 09 осадки, 1 10 полив 6 мм 2-3.10 испарение неинтенсивное	-0,156	0,035	-0,200	0,046
23-24.10 2005 г.	22 10 осадки, испарение неинтенсивное	-0,125	0,039	-0,164	0,038

Таким образом, имеются условия, при которых возможно обнаружение различий в структуре почв, обусловленных различным содержанием гумуса. Эти различия проявляются в степени разрушения почвенных неровностей после сильного увлажнения осадками, талыми водами, поливом; в содержании крупных пор в поверхностном слое; в значениях КДП при больших и средних влажностях. При испарении в почвах с существенными различиями в содержании гумуса могут возникнуть различные градиенты влажности. В условиях совместного действия вышеописанных факторов они могут привести к значительному отличию в радиояркостных температурах почв на длинах волн 11 и 3,6 см

Раздел 3.2 посвящён описанию результатов и выводам по влиянию загрязнений нефтепродуктами на радиояркостные характеристики почвы.

Измерения влияния загрязнений нефтепродуктами на динамику радиояркостной температуры в процессе испарения почвенной влаги были проведены в период с 2004 по 2005

год Изучалось влияние загрязнений нефтепродуктами (минеральное масло марки М-8В) на динамику радиояркой температуры почвы с высоким содержанием гумуса (6,6%). Загрязнение осуществлялось путем распыления масла над воздушно-сухой почвой.

В 2004 г было проведено 5 экспериментальных циклов «полив-испарение» при загрязнении участка эквивалентным слоем 2,7 мм, распределенным по поверхности. В результате впитывания масла загрязненным оказался слой почвы толщиной 3-4 см. При этом поверхностные почвенные агрегаты, загрязненные маслом, перестали впитывать воду и не распадались при поливе, поэтому структура шероховатости после полива изменялась слабо. При этом на поверхности чистой почвы значительная часть агрегатов разрушалась, и степень шероховатости снижалась.

На рисунке 3 приведены данные об изменении радиояркой температуры участков почвы в процессе испарения после интенсивного орошения. Участки с высоким содержанием гумуса (6,6%) – чистый (1) и загрязненный моторным маслом, 7,5% по объему (2). Непосредственно перед орошением яркостные температуры участков имели близкие значения (около 290 К).

Сразу после полива участков слоем воды 20 мм радиояркая температура чистой почвы на всех длинах волн снизилась до 140-150 мм. Радиояркая температура загрязненного

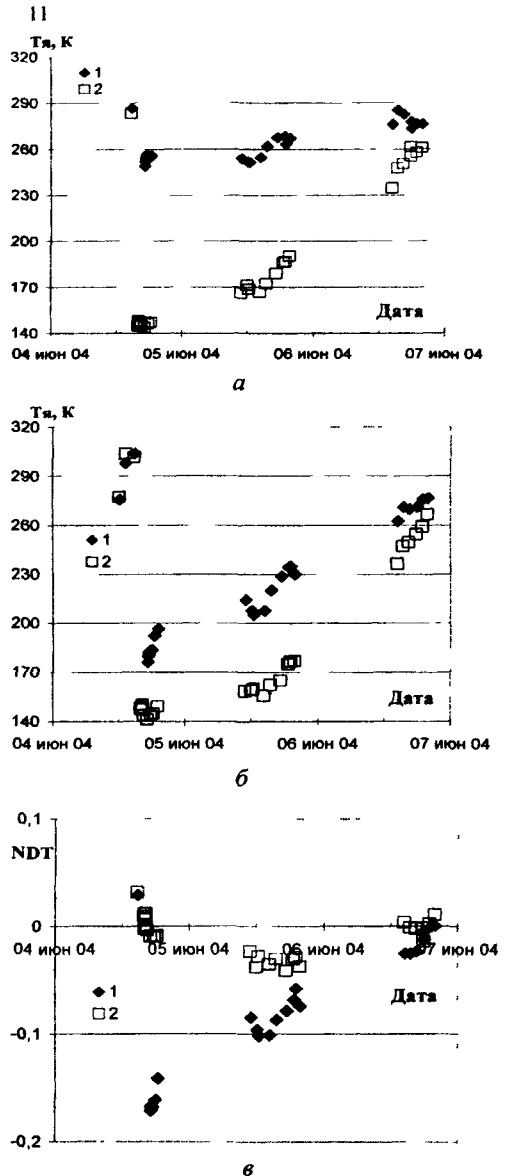


Рис 3 Временная динамика радиояркой температуры почвы с высоким содержанием гумуса, на длинах волн 3,6 см (а), 11 см (б) и нормализованной разности яркостных температур на длинах волн 11 и 3,6 см (в) 1 - почва загрязненная моторным маслом (7,5% по объему), 2 - чистая почва

участка заметно снизилась на длине волны 11 см – до 175 К. На коротких длинах волн это снижение меньше. Указанное различие хорошо проявляется в значениях  $NDT$  (рис 3,б)

Такая разница в излучательных характеристиках загрязненного и чистого участков обусловлена двумя обстоятельствами: во-первых, поверхность чистого участка стала более гладкой, во-вторых, она стала более влажной, так как поверхностный слой загрязненной почвы из-за сильных водоотталкивающих свойств увлажнился мало, а большая часть воды впиталась нижележащей незагрязненной почвой. Именно по причине такого неоднородного по глубине увлажнения загрязненной почвы ее радиояркая температура отлична на разных длинах волн. Кроме того, загрязнение почв нефтепродуктами приводит к понижению КДП при средней и большой влажности [3] и повышению её радиояркой температуры.

Таким образом, загрязненные нефтепродуктами рыхлые почвы отличаются от чистых почв большими по модулю отрицательными значениями  $NDT$  в период после значительного увлажнения. Различие в  $NDT$  для чистых и загрязненных почв наблюдалось во всех экспериментах, когда почва увлажнялась осадками не менее 10 мм. На длинах волн, используемых в эксперименте, период существования таких значений составляет не менее суток. Исследование того же загрязненного участка проведенное в 2005 году после схода снежного покрова показало, что вследствие образования на поверхности загрязненной почвы корки её водопроводимость резко уменьшилась. После полива вода задерживалась в поверхностных неровностях и значения радиояркой температуры на всех длинах волн в течение длительного времени были существенно ниже чем у незагрязненной почвы. Таким образом, низкие значения радиояркой температуры почв и их слабая временная динамика после выпадения осадков свидетельствует о наличии на поверхности почвы корки нефтяного загрязнения.

Раздел 3.3 посвящён описанию результатов исследований и выводам по влиянию зольных загрязнений на радиояркие характеристики почвы.

В 2002–2005 гг. изучалось влияние зольных загрязнений (зола из фильтра ТЭЦ 5 г. Омска) на песчаную почву и почву с высоким содержанием гумуса. Зола, взятая из фильтра ТЭЦ, имеет гранулометрический состав, близкий к составу

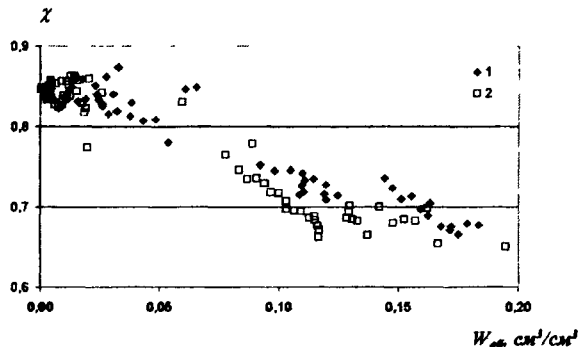


Рис. 4. Зависимость коэффициента излучения участков от объемной влажности грунта в слое 0-1 см на длине волны 3,6 см 1 – песчаная почва загрязненная золой ТЭЦ (10% по объему); 2 – чистая песчаная почва

легкого суглинка. Ее влияние на КДП различных типов почв в частотном диапазоне 0,1-16 ГГц исследовано в работе [3], где показано, что добавление золы в песчаную почву уменьшает КДП в диапазоне средних и больших значений влажности и практически не приводит к изменению КДП почвы с высоким содержанием гумуса.

Влияние загрязнений на КДП песчаной почвы хорошо проявляется на зависимости коэффициента излучения на длине волны 3,6 см  $\chi = T_{\chi}/T$ , где  $T$  – термодинамическая температура измеренная на глубине 0,5 см, от объемной влажности в этом слое (рис. 4). Для ее построения использовались значения коэффициента  $\chi$ , определенные для моментов времени, близких ко времени отбора проб на влажность.

Разброс экспериментальных точек объясняется тем, что на графике приведены данные, полученные в разных экспериментальных циклах, проводимых при отличающихся метеорологических условиях, когда изменение влажности с глубиной в пределах слоя 0-1 см было неодинаковым. При контактных же измерениях определялось только среднее значение влажности в этом слое.

Тем не менее, подтверждается вывод о том, что зольные загрязнения песчаных почв приводят к заметному увеличению в них связанной воды и повышению коэффициента излучения. На рис. 4 видно, что коэффициент излучения загрязненной почвы мало изменяется в диапазонах влажностей 0-0,05 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, что соответствует данным о максимальном количестве связанной влаги в такой почве [3]. Значения коэффициента излучения, приводимые на рис. 4, в области малых значений влажности несколько ниже соответствующих значений для однородно увлажненных почв. Это объясняется тем, что в наших экспериментах у поверхности песчаной почвы преобладали отрицательные градиенты влажности.

Кроме того, добавление золы в песчаную почву повышает ее водоудерживающую способность, поэтому сразу

после полива загрязненная почва имеет большую влажность верхнего слоя и меньшую радиояркую температуру на длине 3,6 см, чем чистая (рис. 5). Загрязненная почва, обладая большей поглощательной способностью в оптическом диапазоне, сильнее нагревается в дневные часы, но при этом сохнет медленнее из-за более низкой пористости по сравнению с чис-

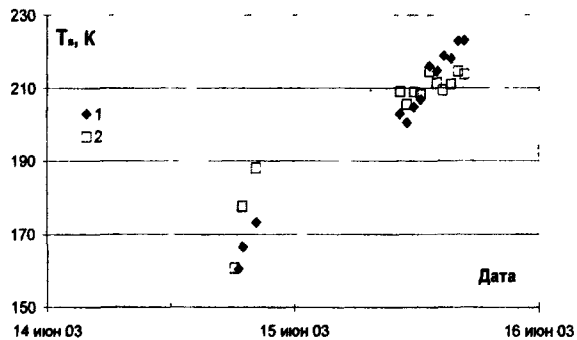


Рис 5 Временная динамика радиояркой температуры песчаной почвы, на длине волны 3,6 см, 1 – песчаная почва загрязненная золой ТЭЦ (10% по объему), 2 – чистая песчаная почва

той. При этом из-за большего содержания связанной влаги её  $T_a$  выше чем у чистой почвы уже через сутки (рис. 5). Различия в водоудерживающей способности на длине волны 11 см проявляются слабее из-за большей глубины зондирования на этой длине волны.

Суглинистые почвы, загрязненные золой, незначительно отличались по значениям  $NDT$  только после достаточно сильного увлажнения. При слабых увлажнениях различия между чистой почвой и почвой, загрязненной золой, практически отсутствуют. При этом наблюдаются различия в радиояркостных температурах, но они примерно одинаковы на длинах волн 11 и 3,6 см.

Таким образом, полученные в процессе наших измерений результаты свидетельствуют о том, что влияние зольных загрязнений на динамику радиояркостных температур наиболее заметно для почв легкого гранулометрического состава. Почвы тяжелого минерального состава, загрязненные золой, в динамике радиояркостных температур отличаются от фоновых в значительно меньшей степени, и выявление таких участков радиометрическим методом является проблематичным. В связи с этим были проведены исследования возможности выявления зон загрязнения зольными выбросами в оптическом и ИК диапазонах.

Раздел 3.4 посвящён расчету радиояркостной температуры  $T_a$  исследуемых участков с использованием данных о КДП исследуемых почв [3] по модели многослойной среды:

$$T_a = (1 - |r'_z|^2) T, \quad r'_{z(j-1)} = \frac{r_{z(j-1)} + r_{z(j)} \exp(-2ik_{z(j-1)} \Delta Z_{(j-1)})}{1 + r_{z(j-1)} r_{z(j)} \exp(-2ik_{z(j-1)} \Delta Z_{(j-1)})}$$

где  $r_{z(j-1)}$  – френелевский коэффициент отражения многослойной среды на границе  $j$ -й и  $(j-1)$ -ой среды,  $r'_{z(j-1)}$  – коэффициент отражения многослойной среды, лежащей ниже  $j$ -го слоя,  $k_{z(j-1)}$ ,  $\Delta Z_{(j-1)}$  – волновое число и толщина  $j-1$  слоя,  $T_a$  – термодинамическая температура почвы. Полученные расчетные значения дают удовлетворительное согласие с экспериментальными данными для всех участков.

Четвертая глава «Определение загрязнения почв в ИК и оптическом диапазоне» посвящена выявлению зон загрязнения с помощью космических снимков ИК и оптического диапазона. Раздел 4.1 посвящен созданию базы данных обзорных снимков КА IKONOS и её использованию для детального определения тестовых участков, используемых в нашем исследовании. В разделе 4.2 дано описание выявления загрязненных территорий с помощью многоспектральных космических снимков.

Исследование открытых почв (без растительности) возможно лишь в сравнительно короткие весенний и осенний периоды. Поскольку в эти периоды часто существует достаточно плотная облачность, нами такие исследования не проводились.

С целью выявления влияния техногенного загрязнения нами исследована динамика яркостных характеристик лесных покровов, расположенных вблизи г. Омска, в видимом

и ближнем ИК диапазонах. В нашем распоряжении были снимки низкого разрешения MODIS-TERRA и NOAA-AVHRR, поэтому лесные участки выбирались в зонах слабого загрязнения, где пространственная неоднородность степени загрязнения существенно меньше, чем в зонах, непосредственно прилегающих к источникам загрязнения.

Выбранные участки находятся в лесостепной зоне. Они отличаются площадью (от 10 до 50 км<sup>2</sup>) и удалённостью от центра источника загрязнения. Для анализа возможности обнаружения зольных и пылевых загрязнений было выделено 11 участков, расположенных как в зоне предполагаемого загрязнения, так и за ее пределами. Номера участков, их расположение показано на рисунке 6. В процессе работы осуществлено создание базы данных этих снимков по Омской области и их координатная привязка.

Известно, что значение вегетационного индекса  $NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$ , где  $NIR$  и  $RED$  – яркость изображения в ближней инфракрасной и красной области спектра соответственно, коррелирует с количеством биомассы растительности.

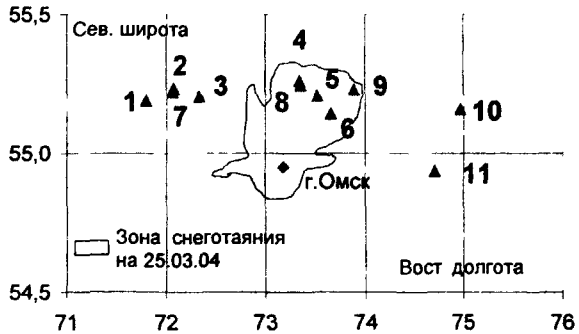


Рис 6 Расположение исследуемых участков леса и зона загрязнения, определяемая по границе снежного покрова

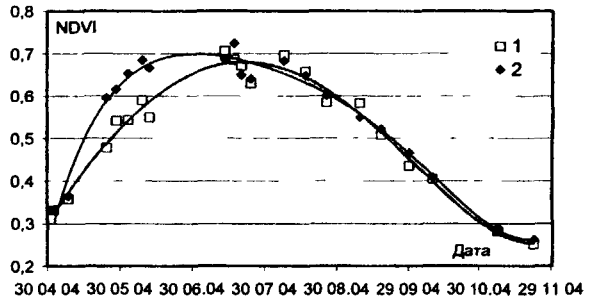


Рис 7 Сезонная динамика усредненных по дням значений  $\langle NDVI \rangle$  лесного покрова 1 – незагрязненная зона, 2 – загрязненная зона

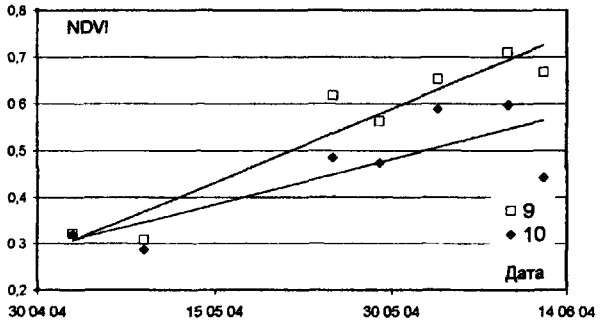


Рис 8 Линейная аппроксимация значений  $NDVI$  №9 и №10 участков в весенний период

На рисунке 7 приведена сезонная динамика усредненных значений  $\langle \text{NDVI} \rangle$  лесного покрова чистых и загрязненных зон, в вегетационный период.

Было установлено, что в загрязненной зоне наблюдается более быстрый рост значений NDVI в начале вегетационного периода (с 3 мая по 12 июня).

На рисунке 8 приведены значения NDVI в этот период для двух участков, один из которых (№10) находится вне зоны загрязнения, а другой (№9) – внутри нее. Линии регрессии данных имеют существенно различающиеся наклоны.

В таблице 2. приведены средние значения коэффициентов наклона уравнений линейной регрессии данных NDVI, чистых и загрязненных участков и их стандартное отклонение  $\sigma$ . В загрязненной зоне индекс NDVI лесного покрова растет примерно в полтора раза быстрее, чем в незагрязненной зоне. При этом рост NDVI начинается практически одновременно.

Быстрый рост NDVI в загрязненной зоне объясняется, по нашему мнению, более ранним прогревом почвы из-за раннего схода снежного покрова. Начало же вегетации определяется температурой воздуха, которая на выбранных для исследования территориях отличалась незначительно.

Таблица 2

Коэффициенты наклона кривой индекса NDVI лиственных лесов  
в весенний период

Прибор/год (период наблюдений)	Загрязненная зона		Незагрязненная зона	
	$\langle k \rangle$ , 1/сут.	$\sigma$	$\langle k \rangle$ , 1/сут.	$\sigma$
AVHRR/2003 (10.05-25.05)	0,0287	0,0012	0,0245	0,0021
MODIS/2004 (03.05-12.06)	0,0095	0,0006	0,0064	0,0007

Характер изменения NDVI в течение летнего и осеннего периодов разных лесных участков примерно одинаков, что свидетельствует об отсутствии заметной деградации лесной растительности под воздействием загрязнений низкой концентрации.

Преимуществом предложенного способа обнаружения зон загрязнения, по сравнению с методами, основанными на влиянии загрязнения на отражательные свойства снежного покрова, является его меньшая зависимость от погодных условий вследствие продолжительности наблюдаемого эффекта.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе, и сделаны **выводы**:

- получены временные зависимости радиояркостной температуры чистых и загрязненных почв с различным гранулометрическим составом и содержанием гумуса, на длинах волн 3,6, 5 и 11 см;
- установлено, что наибольшие различия в градиентах влажности поверхностного слоя почв с различным содержанием гумуса, обнаруживаемые радиометрическим методом, наступают через 1-2-е суток после снеготаяния или интенсивного полива;

- определены длины волн, на которых возможно эффективное обнаружение различий в градиентах влажности;
- впервые указана возможность оценки структуры почвы на основании одномоментных измерений радиояркостной температуры на длинах волн 3,6 и 11 см;
- впервые исследовано влияние зольных и нефтяных загрязнений на динамику радиояркостной температуры почв с различным гранулометрическим составом на длинах волн 3,6, 5 и 11 см, в широком диапазоне влажностей;
- установлена возможность выявления зон нефтяных загрязнений по результатам измерения радиояркостной температуры на длинах волн 3,6 и 11 см;
- установлена возможность оценки толщины слоя, загрязненного нефтепродуктами по результатам измерения радиояркостной температуры на нескольких длинах волн, если глубина зондирования на самой большой длине волны превышает глубину загрязненного слоя;
- обнаружено влияние зольных и пылевых загрязнений на динамику вегетации растительности в окрестностях крупного промышленного города;
- установлено, что на загрязненных почвах наблюдается более быстрый рост вегетационного индекса лесного покрова.

#### Список основных публикаций по теме исследования

1. *Беляева Т.А., Бобров П.П., Кривальцевич С.В., Мандрыгина В.Н.* Дзелько-влажностные зависимости почв, загрязненных зольными выбросами ТЭЦ // Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн 2-4 июля 2002 года. – Н. Новгород. – 2002. – С. 239-240. 0,1 п.л., (авторских 20%).
2. *Бобров П.П., Гидлевский А.В., Кривальцевич С.В., Стасюк В.Д., Щеткин И.М.* О выборе рабочих длин волн при исследовании влияния степени деградации почвенного покрова на динамику радиояркостной температуры в процессах промерзания и оттаивания // Естественные науки и экология. Ежегодник. Вып. 7: Межвузовский сборник научных трудов. – Омск: Изд-во ОмГТУ. – 2003. – С. 11-14. 0,25 п.л., (авторских 20%).
3. *Бобров П.П., Жиров П.В., Кондриков Е.М., Кривальцевич С.В., Щеткин И.М.* Радиофизический комплекс для исследования свойств почв в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах // Естественные науки и экология. Ежегодник. Вып. 7: Межвузовский сборник научных трудов. – Омск: Изд-во ОмГТУ. – 2003. – С. 7-11. 0,25 п.л., (авторских 20%).
4. *Бобров П.П., Ивченко О.А., Кривальцевич С.В.* О возможности оценки качества почв микроволновым радиометрическим методом // Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами: Сборник докладов Второй всероссийской научной конференции 16-18 июня 2004 г. – Санкт-Петербург, РГТМУ. – 2004. – С. 43-46. 0,25 п.л., (авторских 35%).
5. *Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Ивченко О.А., Кривальцевич С.В., Мандрыгина В.Н.* Влияние гранулометрического состава, гумуса и зольных загрязнений на излучательные и диэлектрические характеристики почв в микроволновом диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физиче-

- ские основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сборник научных статей. – М.: Полиграф сервис. – 2004. – С. 333-339. 0,4 п.л., (авторских 15%).
6. *Афанасьев А Л, Бобров П П, Ивченко О А, Кривальцевич С В* Оценка тепловых потоков при испарении с поверхности почв по метеорологическим параметрам и данным микроволновой радиометрии // Естественные науки и экология Ежегодник. Вып. 8: Межвузовский сборник научных трудов. – Омск. Изд-во ОмГПУ. – 2004. – С. 3-6. 0,25 п.л., (авторских 25%).
  7. *Бобров П П, Жиров П.В., Ивченко О А, Кривальцевич С В, Яценко А С.* Изменение гидро-радиофизических характеристик песчаного грунта под воздействием зольных загрязнений // Естественные науки и экология. Ежегодник. Вып 8: Межвузовский сборник научных трудов. – Омск: Изд-во ОмГПУ. – 2004. – С. 7-10. 0,25 п.л., (авторских 20%).
  8. *Бобров П.П., Галеев О.В., Кривальцевич С В* Временная динамика коэффициента радиотеплового излучения почв в процессах испарения, промерзания и оттаивания / Солнечно-земная физика. Вып.5. Сборник научных трудов. – Иркутск: Изд-во СО РАН. – 2004. – С. 68-70. 0,2 п.л., (авторских 35%).
  9. *Бобров П П, Ивченко О А, Кривальцевич С В* Исследование почвенной структуры методом двухчастотной микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса. – 2005. – №2. – С. 82-88. 0,4 п.л., (авторских 35%).
  10. *Кривальцевич С В* Экологический мониторинг окрестностей промышленного города при помощи космических снимков // Сб. тезисов Одиннадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных: Тезисы докладов: В 1 т. – Т 1 – Екатеринбург: Издательство АСФ России – 2005. – С. 389-390. 0,05 п.л.
  11. *Bobrov P.P., Zhiron P.V., Ivchenko O.A., Krivaltsevitsh S.V., Stasuk V.D.* Observed Effects of Humus, Salt Contents and Soil Contamination on the Microwave Emissivity of Soils // Proc. of International Symposium on Remote Sensing of Environment, 22-24 June, Saint Peterburg, 2005. – 4p (CD-ROM). 0,25 п.л. (авторских 20%).
  12. *Mironov V.L., Bobrov P.P., Ivchenko O.A., Krivaltsevitsh S.V., Jaschenko A.S.* Dynamic Radiobrightness for Drying Soils as a Function of Humus Content // Proc. of IGARSS'2005, 25-29 July, Seoul, Korea. 2005. – в. II. – P.1127-1130. 0,2 п.л., (авторских 20%).
  13. *Бобров П.П., Дмитриев В В., Кривальцевич С В* Сезонная динамика NDVI лесных покровов в зонах слабого промышленного загрязнения вблизи г. Омска // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-11-2005): Доклады 11-й Международной научно-практич. конференции, Барнаул, 26-28 сент. 2005 г. / Отв. Ред. В.Н. Маслеников. – Томск: Том. гоc. ун-т. – 2005. – С. 44-47. 0,15 п.л., (авторских 35%).

#### Литература:

1. *Бобров П П, Галеев О.В.* Динамика радиояростной температуры почв с различным содержанием гумуса // Исследование Земли из космоса. – 2001. №4. – С. 66-72.
2. *Комаров С А, Миронов В Л.* Микроволновое зондирование почв. – Новосибирск: Научно-издательский центр СО РАН, 2000. – 289 с.
3. *Мандрыгина В Н* Диэлектрическая проницаемость почв с различным содержанием гумуса и влияние на неё гидрофобных и гидрофильных загрязнителей: Дис. ... канд. физ. - мат. наук. – Омск. 2004. – 165 с.

Кривальцевич Сергей Викторович

Дистанционное зондирование деградированных почв

25.00.35 – геоинформатика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Подписано в печать 21.11.2005. Формат бумаги 60x84 1/16.  
Печ. л. 1,25 Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ 526.

---

*Издательство ОмГУ  
644077, г. Омск, пр. Мира, 55А, госуниверситет*

23386

РНБ Русский фонд

2006-4

25888