

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В.И. Харук

подпись

« _____ » _____ 2016 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

09.03.02 - Информационные системы и технологии

Микроволновая съемка SMAP в анализе гидрологического режима лесных
территорий

Руководитель _____ зав.каф., д.б.н., проф. В. И. Харук
подпись, дата

Выпускник _____ Я. А. Амелина
подпись, дата

Нормоконтролер _____ Е.В. Федотова
подпись, дата

Красноярск 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Обзор предметной области.....	5
1.1 Гидрологический режим лесных территорий	6
1.2 Обзор методов дистанционного зондирования Земли	7
1.2.1 Исторический экскурс	7
1.2.2 Аэрокосмические снимки.....	9
1.2.3 Сканерные съемки.....	9
1.2.4 Радарные съемки	10
1.2.5 Инфракрасная съёмка в тепловом диапазоне.....	11
1.2.6 Лидарная съемка.....	11
1.3 Микроволновая съемка со спутника SMAP	12
1.3.1 Характеристики прибора SMAP.....	13
1.3.2 Формат данных.....	15
2 Объект исследования	16
3 Используемое программное обеспечение	18
4 Предварительная обработка и анализ данных	20
Заключение	37
Список использованных источников	38

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих регионах планеты наблюдается ухудшение состояния и усыхание хвойных лесов, вызванное комбинацией различных стрессовых факторов биотической и абиотической природы. На территории Прибайкалья, а именно, в районе хребта Хамар-Дабан усыхание пихты сибирской наблюдается с середины 1970-х гг. Нарушение состояния пихтовых лесов усугубляется падением репродуктивного потенциала и ухудшением естественного возобновления [1].

Процесс усыхания древостоев может длиться от года до нескольких лет. С помощью современных технических средств эти процессы можно отследить. На сегодняшний день существует множество спутников для наблюдения за растительным покровом (RapidEye, Terra/MODIS и др). Однако перспективным инструментом для наблюдения за засухой и ее исследования может стать новейший спутник SMAP, запущенный НАСА в январе 2015 года. Основным его преимуществом является высокое пространственное разрешение снимков относительно других спутниковых радиолокационных пассивных систем. Новый спутник – это два усовершенствованных инструмента, которые работают вместе для максимального получения информации о влажности почвы. Его активный радар работает так же, как вспышка камеры, но вместо передачи видимого света, он передает микроволновые импульсы, которые проходят через облака и умеренную растительность на землю. Его пассивный радиометр работает как естественный свет камеры, захватывает отражаемые СВЧ-излучения. Микроволновое излучение чувствительно к количеству влаги содержащейся в почве. Данные со спутника передаются на сервер каждые 2-3 дня, что позволяет оперативно оценивать информацию. Благодаря собственным алгоритмам обработки данных минимизируется ошибка в расчетах и неопределенность каждого компонента оценки [2].

Целью бакалаврской работы является анализ применимости микроволновой съемки SMAP в оценке гидрологического режима лесных территорий Прибайкалья (хребет Хамар-Дабан).

Задачи работы:

- получить оценки влажности корнеобитаемого слоя на основе спутниковых наблюдений SMAP;
- сформировать временной ряд данных SMAP в виде многослойного растра для исследования динамики влажности почвы в лесах хребта Хамар-Дабан.
- выполнить сравнительный анализ динамики влажности почв, температуры и влажности воздуха.

1 Обзор предметной области

Спутник SMAP (Soil Moisture Active Passive) NASA (National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства), был запущен 31 января 2015 года с космодрома Ванденберг, штат Калифорния. На заданную полярную орбиту спутник вывела ракета носитель Delta II. Использование спутника планируется в течение минимум трех лет. Спутник SMAP является космическим аппаратом дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), одна из основных его задач – измерение влажности почв Земли. Также SMAP позволяет получить точные данные состояний замерзания/оттаивания почвы, с помощью которых можно более подробно изучить круговорот воды в природе, а так же круговорот энергии и углерода. Более того, на основе приборов SMAP ученые планируют исследовать соленость морской воды, прогнозировать наводнения, а также, наблюдать за штормами на океанской поверхности.

Прибор SMAP включает в себя радиолокатор L-диапазона и радиометр L-диапазона, использующие один рупорный облучатель и параболический сетчатый отражатель. Активный радиолокатор и радиометр должны были дополнять друг друга. Радиометр позволял делать измерения с высоким разрешением до 3 км, однако, с более низкой точностью, для понимания поверхностной влажности почвы. Микроволновый радиометр обладает более низким разрешением – 40 км, но более точен в своих измерениях. Сочетая измерения двух приборов, SMAP должен был оценивать влажность почвы с разрешением 9 км. 7 июля 2015 года активный радиометр прекратил свою работу. После проведения ряда диагностических тестов, как на спутнике, так и на Земле, а также попытки запуска радарного модуля 24 августа, инженеры сообщили о невозможности восстановления радиометра. Однако, почти три месяца объединенных активных и пассивных измерений являются уникальными в своем роде. На основе уже полученной информации ученые могут оценить преимущества данного подхода для будущих исследований [2].

1.1 Гидрологический режим лесных территорий

Гидрологический режим лесных территорий – это совокупность нескольких процессов, таких как поступление, передвижение и физическое превращение влаги в почве, удержание и расход воды. Потребление и испарение влаги древесными породами напрямую зависит от водного баланса почвы. Испарение увеличивается при избытке влаги в почве и уменьшается при ее недостатке.

Говоря об увлажнении почвы, кроме оптимальной, необходимо разделять минимальную и максимальную степени увлажнения почвы, качественно влияющие на жизнь леса. Особенно негативно на состоянии леса сказывается минимум влаги, т.е. засуха. Противоположный эффект оказывает излишек влаги в почве, он вызывает заболачивание. Также излишнее количество влаги негативно сказывается на росте большей части древесных пород.

Различают потребность и требовательность древесных пород к влаге. Потребность – это количество влаги, которое требуется растению для удовлетворения его жизнедеятельности, поддержания давления его тканей, а также нормального хода процессов фотосинтеза, дыхания, защиты от перегрева, обмена веществ между различными органами растения и т.п. Требовательность – это отношение растения к условиям влажности почвы, способность к извлечению нужного количества влаги в различных почвенных условиях. Потребность во влаге является одним из обязательных элементов, слагающих требовательность.

Водный баланс складывается из прихода в виде осадков и расхода в различных видах испарения, а также стока воды, инфильтрации ее в глубинные горизонты почвы, аккумуляции влаги лесным фитоценозом и потребления ее почвенными микроорганизмами [3].

Каждый год уничтожаются огромные территории леса, но в то же время проводятся различные мероприятия по восстановлению лесов, образованию защитных полос и водоохраных зон. Результатом же являются большие

изменения гидрологических процессов, чаще всего имеющих деструктивный характер (например, перераспределение речного стока во времени и пространстве). Вследствие этого, актуальность проблемы гидрологического режима леса приобретает особое значение и требует тщательного изучения и анализа [4].

1.2 Обзор методов дистанционного зондирования Земли

Дистанционное зондирование (ДЗ) - это процесс или метод получения информации об объекте, участке поверхности или явлении путём анализа данных, собранных без контакта с изучаемым объектом. Оно представляет собой важнейший источник получения оперативной и современной информации о природной среде для тематических слоёв в геоинформационных системах (ГИС), для поддержания данных в актуальном состоянии и других целей. ГИС-технологии способствуют их эффективному совместному использованию [5].

Результатом дистанционного зондирования являются космические снимки. При помощи ГИС космоснимки можно использовать для мониторинга земной поверхности и дальнейшего эффективного принятия решений. Для дешифрирования объектов наряду с визуальными методами применяются и численные методы анализа снимков. При изучении поверхности методами ДЗ носителем информации выступает собственное и отражённое излучение объектов. Дистанционная идентификация объектов происходит благодаря фиксируемым характеристикам излучения, зависящим от пространственного положения, состояния и свойств объекта.

1.2.1 Исторический экскурс

Дистанционные методы применяются в исследованиях Земли с давних пор. Изначально люди рисовали снимки, отражая на них взаимное

расположение объектов в пространстве. Позже, изобретение фотографии обеспечило возможность фототеодолитной съемки, по таким снимкам составлялись карты горных районов. С развитием авиации, появилась возможность получать изображения местности сверху, в плане. Такие изображения называются аэрофотоснимками.

Само же понятие ДЗ появилось еще в XIX, сразу после появления фотографии. Впервые метод дистанционного зондирования стали применять в астрономии. Позже началось использование и в военных целях – для принятия стратегических решений, для наблюдения за перемещением войск и сбора информации о передвижении противника и т.д. Благодаря финансированию исследований различными государствами были разработаны новые технологии, позволившие создать сенсоры для использования этого метода и в гражданских целях. С тех пор началось применение метода ДЗ для наблюдения за окружающей средой, стала возможной оценка развития территорий и гражданская картография. Следующим, большим скачком в развитии ДЗ стало появление космических ракет и спутников в 60-х годах XX века – дистанционное зондирование вышло в космос.

Одновременно с запуском разведывательных спутников, целью которых было получение фотоснимков с низких орбит, возросли и возможности ДЗ. Первые спутники работали на орбите от 7 до 8 дней, позже стало возможным получение данных в течение нескольких месяцев. В 1981 году были получены многозональные снимки, имеющие разрешение 100 метров в видимом и близком инфракрасном диапазоне с использованием девяти спектральных каналов.

В США 1 апреля 1960 года был запущен первый метеорологический спутник. Стал возможным прогноз погоды, перемещение циклонов и другие побочные задачи.

Европейский космический консорциум вывел на орбиту радарные спутники в 1991 году, а Канада в 1995 году [5].

1.2.2 Аэрокосмические снимки

Аэрокосмические снимки — основной результат аэрокосмических съемок, для выполнения которых используют разнообразные авиационные и космические носители. Аэрокосмические съемки делят на пассивные, которые предусматривают регистрацию отраженного солнечного или собственного излучения Земли, и активные, при которых выполняют регистрацию отраженного искусственного излучения.

Аэрокосмический снимок — это двумерное изображение реальных объектов, которое получено по определенным геометрическим и радиометрическим (фотометрическим) законам путем дистанционной регистрации яркости объектов и предназначено для исследования видимых и скрытых объектов, явлений и процессов окружающего мира, а также для определения их пространственного положения. Диапазон масштабов современных аэрокосмических снимков огромен: он может меняться от 1:1000 до 1:100 000 000, т. е. в сто тысяч раз. При этом наиболее распространенные масштабы аэрофотоснимков лежат в пределах 1:10 000—1:50 000, а космических — 1:200 000—1:10 000 000. Все аэрокосмические снимки принято делить на аналоговые (обычно фотографические) и цифровые (электронные). Изображение цифровых снимков образовано из отдельных одинаковых элементов — пикселей; яркость каждого пикселя характеризуется одним числом [5].

1.2.3 Сканерные съемки

В настоящее время для съемок из космоса наиболее часто используются многоспектральные оптико-механические системы - сканеры, установленные на ИСЗ различного, назначения. При помощи сканеров формируются изображения, состоящие из множества отдельных, последовательно получаемых элементов. Термин "сканирование" обозначает развертку

изображения при помощи сканирующего элемента (качающегося или вращающегося зеркала), поэлементно просматривающего местность поперек движения носителя и посылающего лучистый поток в объектив и далее на точечный датчик, преобразующий световой сигнал в электрический. Этот электрический сигнал поступает на приемные станции по каналам связи. Изображение местности получают непрерывно на ленте, составленной из полос - сканов, сложенных отдельными элементами - пикселями. Сканерные изображения можно получить во всех спектральных диапазонах, но особенно эффективным является видимый и ИК-диапазоны. При съемке земной поверхности с помощью сканирующих систем формируется изображение, каждому элементу которого соответствует яркость излучения участка, находящегося в пределах мгновенного поля зрения. Сканерное изображение - упорядоченный пакет яркостных данных, переданных по радиоканалам на Землю, которые фиксируются на магнитную ленту (в цифровом виде) и затем могут быть преобразованы в кадровую форму [5].

1.2.4 Радарные съемки

Радиолокационная (РЛ) или радарная съемка - важнейший вид дистанционных исследований. Используется в условиях, когда непосредственное наблюдение поверхности планет затруднено различными природными условиями: плотной облачностью, туманом и т. п. Она может проводиться в темное время суток, поскольку является активной. Для радарной съемки обычно используются радиолокаторы бокового обзора (ЛБО), установленные на самолетах и ИСЗ.

С помощью ЛБО радиолокационная съемка осуществляется в радиодиапазоне электромагнитного спектра. Сущность съемки заключается в послышке радиосигнала, отражающегося по нормали от изучаемого объекта и фиксируемого на приемнике, установленном на борту носителя. Радиосигнал вырабатывается специальным генератором. Время возвращения его в приемник

зависит от расстояния до изучаемого объекта. Этот принцип работы радиолокатора, фиксирующего различное время прохождения зондирующего импульса до объекта и обратно, используется для получения РЛ-снимков. Изображение формируется бегущим по строке световым пятном. Чем дальше объект, тем больше времени надо на прохождение отражаемого сигнала до его фиксации электронно-лучевой трубкой, совмещенной со специальной кинокамерой [5].

1.2.5 Инфракрасная съёмка в тепловом диапазоне

Инфракрасная (ИК), или тепловая, съёмка основана на выявлении тепловых аномалий путем фиксации теплового излучения объектов Земли, обусловленного эндогенным теплом или солнечным излучением. Она широко применяется в геологии. Температурные неоднородности поверхности Земли возникают в результате неодинакового нагрева различных ее участков. Инфракрасный диапазон спектра электромагнитных колебаний условно делится на три части (в мкм): ближний (0,74-1,35); средний (1,35-3,50); дальний (3,50-1000).

Солнечное (внешнее) и эндогенное (внутреннее) тепло нагревает геологические объекты по-разному в зависимости от литологических свойств пород, тепловой инерции, влажности, альбедо и многих других причин. ИК-излучение, проходя через атмосферу, избирательно поглощается, в связи с чем тепловую съёмку можно вести только в зоне расположения так называемых "окон прозрачности" - местах пропускания ИК-лучей [5].

1.2.6 Лидарная съёмка

Лидарная съёмка является активной и основана на непрерывном получении отклика от отражающей поверхности, подсвечиваемой лазерным монохроматическим излучением с фиксированной длиной волны. Частота

излучателя настраивается на резонансные частоты поглощения сканируемого компонента (например приповерхностного метана), так что в случае его заметных концентраций соотношение откликов в точках концентрирования и в вне их будут резко повышенными. Фактически, лидарная спектрометрия это геохимическая съемка приповерхностных слоев атмосферы, ориентированная на обнаружение микроэлементов или их соединений, концентрирующихся над современно активными геоэкологическими объектами. Устройства лидарной съемки оборудуются на низковысотных носителях [5].

1.3 Микроволновая съемка со спутника SMAP

Получение влажности корневой зоны почвы важно для нескольких ключевых задач SMAP. Алгоритм «L4_SM» использует фильтр Калмана чтобы совместить измерения SMAP с оценками влажности почвы НАСА для создания дренажной модели земной поверхности. Дренажная модель будет описывать вертикальные передвижения влажности почвы между поверхностью и резервуаром корневой зоны и будет зависеть от данных наземных метеорологических наблюдений, в том числе и осадков, на фиксированной 9 км сетке с временным шагом 7,5 мин. Фильтр Калмана считает соответствующие неопределенности каждого компонента оценки и, надлежащим образом калибрует входные неопределенности, что на выходе дает продукт, который превосходит спутниковые или наземные модели данных. Также генерируется оценка погрешности для продукта «L4_SM».

Базовый алгоритм «L4_SM» позволяет получить следующим три продукта SMAP:

– яркостная температура с пространственным разрешением 9 км (полученные из данных с 36 км пространственным разрешением с помощью алгоритма «L2_SM_AP» на основе измерения обратного рассеяния высокого разрешения с активного радиолокатора);

– яркостная температура с пространственным разрешением 36 км («L1C_TB»);

– наблюдения состояний замерзания/оттаивания почвогрунтов (с «L3_FT_A»).

Данные производятся с шагом в 3 часа (1 ч, 4 ч, ..., 22 ч) на основе сырых продуктов SMAP. Базовый алгоритм «L4_SM» анализирует аномалии яркостной температуры с учетом сезонных циклов значений. Данные о замерзании/оттаивании корнеобитаемого слоя вычисляются на основе методов, аналогичных существующим алгоритмам оценки снежного покрова [6].

1.3.1 Характеристики прибора SMAP

В таблице 1 приведены функциональные требования к SMAP, соответствующие научным потребностям. Целью объединения данных пассивного и активного радиолокаторов (с точки зрения их разрешения и чувствительности к влажности почвы, шероховатости поверхности и растительности) являются оценки влажности почвы с разрешением 10 км и состояния замерзания/оттаивания с пространственным разрешением 1-3 км.

Таблица 1 – Функциональные требования спутника SMAP

Научные требования к измерениям	Функциональные требования
<p>Влажность почвы: $\sim \pm 0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ объемная точность (1-сигма) на поверхности 5 см для содержания водной растительности $\leq 5 \text{ кг м}^{-2}$; Гидрометеорология при разрешении $\sim 10 \text{ км}$ Гидроклиматология при разрешении $\sim 40 \text{ км}$</p>	<p>Радиометр L-диапазона (1.41 ГГц): Поляризация: V, H Разрешение: 40 км Радиометрическая ошибка*: 1.3К Радариолокатор L-диапазона (1.26 и 1.29 ГГц): Поляризация: VV, HH, HV (или VH) Разрешение: 10 км Относительная погрешность*: 0.5 dB (VV и HH) Углы обзора** между 35° и 50°</p>
<p>Состояния Замерзания/Оттаивания: Определение переключения состояний замерзания/оттаивания в растительно-почвенном слое с двухдневной точностью, в пространственном масштабе ландшафтной изменчивости ($\sim 3 \text{ км}$)</p>	<p>L-Band радар (1.26 и 1.29 ГГц): Поляризация: HH Разрешение: 3 км Относительная погрешность*: 0.7 dB (1 dB на канал, если используются 2 канала) Углы обзора** между 35° и 50°</p>
<p>Наблюдения минимум за три годовых цикла</p>	<p>Базовый срок миссии – 3 года</p>
<p>* Включает точности и калибровки стабильности</p>	
<p>** Определено безотносительно к местной топографической вариации</p>	

Прибор SMAP включает в себя радиолокатор L-диапазона и радиометр L-диапазона, которые используют один рупорный облучатель и параболический сетчатый отражатель. Отражатель смещен от надира и вращается вокруг оси надира со скоростью 14,6 оборотов в минуту (номинально), обеспечивая приблизительно 40°-ный угол падения луча сканирования конической антенны. Использование постоянного угла сканирования упрощает обработку данных и позволяет точно оценить изменение влажности почвы и изменение состояний замерзания/оттаивания. Отражатель имеет диаметр 6 м. Реальная апертура радиолокационных и радиометрических данных собирается глобально в течении восходящих и нисходящих проходов. Для получения желаемого высокого пространственного разрешения радиолокатор использует эффект Доплера (Doppler discrimination). Радиолокационные данные могут быть обработаны с улучшением пространственного разрешения до 1-3 км [6].

Базовые параметры орбиты:

- высота орбиты: 685км (2-3 дня среднее повторение и 8 дней точное повторение);
- наклонение: 98°, солнечно-синхронная орбита;
- местное время восходящего узла – 6 часов вечера.

1.3.2 Формат данных

Данные со спутника SMAP поставляются в формате *.h5 и открыты для общего доступа на сайте <http://nsidc.org/>. Единственным и обязательным условием получения данных является регистрация на вышеуказанном сайте.

Формат *.h5 – это иерархический формат данных (Hierarchical Data Format, HDF). Изначально формат HDF был разработан Национальным центром суперкомпьютерных приложений (NCSA) для хранения больших объемов информации. На данный момент поддерживается некоммерческой организацией HDF Group.

Формат *.h5 поддерживается многими программами, как коммерческими, так и некоммерческими. Библиотеки для работы с форматом и связанные с ним утилиты доступны для использования со свободной лицензией. Свободно распространяемый пакет HDF состоит из библиотеки, утилиты командной строки, исходных текстов для тестирования, интерфейса и программы для просмотра HDF-файлов.

Однако, из-за большого количество хранящейся в них информации, HDF-файлы имеют большой вес, что создает трудности при их обработке в виде излишних затрат времени. Чтобы сократить временные затраты, данные были преобразованы в формат *.tif (Tagged Image File Format, формат файла размеченного изображения) – формат для хранения растровых графических изображений. Данный формат позволяет сжимать файлы без потери информации, а также хранить несколько слоев изображения в одном файле.

Имена файлов при скачивании имеют вид: SMAP_L4_SM_gph_20150521T043000_Vb1010_001.h5, где «SMAP_L4_SM_gph_» название миссии, «20150521» - дата съемки (ггггммдд), «T043000» - время съемки (4 часа) и разрешение (3км).

Конвертация данных была выполнена в программном обеспечении ArcGIS.

2 Объект исследования

Лесные экосистемы подвергаются деструктивному влиянию некоторых факторов, вследствие которых уменьшаются площади лесов, а также полнота древостоев, санитарное состояние лесов ухудшается. Грибные и бактериальные болезни, хвоегрызущие вредители, ветровалы, и, в особенности, пожары являются наиболее деструктивными. Зачастую, негативные факторы проявляются комплексно, и один является следствием другого (очаги вредных насекомых возникают вследствие ветровалов, а атмосферное загрязнение снижает устойчивость лесов к возбудителям болезней и т.п.). В связи с этим,

при изучении вопроса о причинах деструкции лесов факторы, влияющие на процесс, необходимо рассматривать комплексно, а их выявление является актуальной экологической проблемой на сегодняшний день [7].

Объектом исследования является территория Прибайкалья, горный район хребта Хамар-Дабан (рисунок 1). Он имеет важное экологическое значение в виду того, что является одной из составляющих сохранения такого природного наследия, как озеро Байкал. Имеются подтвержденные данные о том, что в данном районе происходит усыхание древостоев.

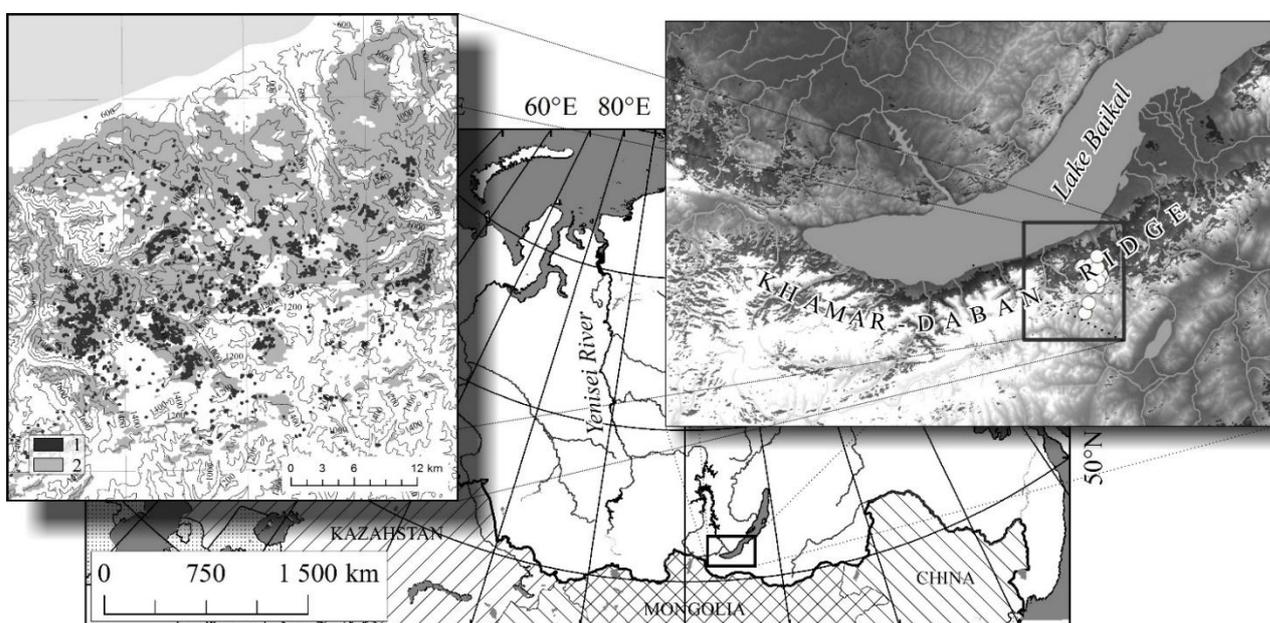


Рисунок 1 – Карта-схема расположения основной зоны повреждений лесов Хамар-Дабана (отмечена прямоугольником). Пробные площади указаны белыми точками

В 2013 году в диссертации Ставникова Д. Ю. были предоставлены результаты дендрохронологического анализа темнохвойных древостоев Южного Прибайкалья. Было установлено, что главным фактором формирования деструктивных процессов в лесах являются климатические изменения и прежде всего засуха в летние месяцы, которая провоцирует

вспышки увеличения численности хвоегрызущих и стволовых насекомых, а также увеличение грибных и бактериальных заболеваний деревьев [7].

Согласно принципам лесорастительного районирования, леса Хамар-Дабана выделены в отдельный Хамар-Дабанский округ таежно-черневых и горнотаежных пихтовых и кедровых лесов. Тип поясности растительного покрова определен как прибайкальский суббореальный влажный тип лесов с присутствием основных поясов:

а) лесных - таежно-черневого (пихтового и пихтово-кедрового); горнотаежного темнохвойного (пихтового и пихтово-кедрового); подгольцово-субальпийского (пихтового и пихтово-кедрового);

б) нелесных - подгольцово-тундрового, горно-лугового и горно-тундрового.

Лесообразующими породами являются сосна сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.). Пихтово-кедровые леса являются самыми восточными таежно-черневыми массивами в пределах гор Южной Сибири и определены как древняя формация, сохранившаяся на территории Байкальской Сибири с третичного периода [8].

3 Используемое программное обеспечение

Для работы с данными со спутника SMAP было выбрано программное обеспечение (ПО) ArcGIS, так как оно обладает всеми необходимыми функциями и инструментами для обработки такого типа данных.

ArcGIS – это масштабируемая система программ, позволяющая создавать, управлять, интегрировать, анализировать и распространять географические данные на любом уровне, от индивидуума до огромной распределенной корпорации. Благодаря использованию стандартов компонентной модели объектов (COM), расширяемой спецификации языка для создания web-страниц

(XML), структурированного языка запросов (SQL), ArcGIS может быть интегрирована со структурой информационной системы любой организации.

Основные поддерживаемые форматы:

- базы геоданных, таблицы OLE DB;
- растровые форматы: IMG, HDF, SID, TIF, NITF, ESRI Gid;
- векторные форматы: ESRI Shape-файл, VPF, DXF, SDTS.

Продукты ArcGIS способны обеспечить полный набор инструментов (более 450), требуемых для создания и управления географическими данными, их анализа и конвертации, а также геокодирования, динамической сегментации, картографии, работы с растрами. ArcGIS обладает набором инструментов, позволяющих совершать от оверлейных операций, построения буферных зон, инструментов для выявления пространственных закономерностей и управления данными до расширенных возможностей обработки растров, методов интерполяции и оценки качества данных, зональной фильтрации, многофакторного анализа, растровой алгебры, построения и проверки топологии, построения графических схем. Основными среди приложений ArcGIS являются ArcMap, ArcCatalog и ArcToolbox. ArcMap предназначен для работы с пространственными данными и создания картографического продукта. ArcCatalog используется для поиска и управления пространственными данными. ArcToolbox позволяет использовать средства конвертации и геообработки данных. Все программы, входящие в состав ArcGIS, включают в себя все эти три приложения.

Лицензии программного обеспечения являются однопользовательскими или совместными. Однопользовательские лицензии позволяют использовать программное обеспечение лишь на одном компьютере и поэтому не обращаются к менеджеру лицензий. Совместные лицензии находятся под контролем менеджера лицензий, который действует в компьютерной сети организации, к таким лицензиям можно получить доступ с любого компьютера в сети [9].

Для обработки и анализа цифровой информации, построения графиков, использовалась компьютерная программа Microsoft Excel, входящая в пакет ПО Microsoft Office. По своей сути Microsoft Excel – это большая таблица, предназначенная для внесения в нее данных. При этом, кроме числовых и финансовых операций, Microsoft Excel может использоваться в процессе анализа данных, открывая пользователям широкие возможности для удобной автоматизации и обработки данных.

Особенность программы заключается в том, что она позволяет осуществлять сложные расчеты. То есть в процессе вычисления одновременно можно оперировать данными, которые располагаются в разных зонах электронной таблицы и при этом связаны определенной зависимостью. Выполнение таких расчетов осуществляется благодаря возможности введения различных формул в ячейки таблицы. После выполнения вычисления результат будет отображаться в ячейке с формулой. В доступном диапазоне формул находятся разные функции – от сложения и вычитания до вычислений, связанных с финансами или статистикой.

Важная особенность использования электронной таблицы заключается в автоматическом пересчете результатов, если изменяются значения ячеек. Microsoft Excel рассчитан на поддержку и использование XML-форматов, а также может открывать такие форматы, как CSV, DBF, SYLK, DIF.

4 Предварительная обработка и анализ данных

С геопортала <http://nsidc.org/> в формате HDF было импортировано 248, а затем еще 428 файлов в формате HDF, после чего они были преобразованы в формат *.tif. Так как изображения многослойные, необходимо было извлечь слои, содержащие данные о влажности почвы на глубине 100 см, влажности и температуре воздуха. Для автоматизации процесса преобразования формата файлов, извлечения необходимых слоев и подсчета статистики использовались

дополнительные функции для ПО ArcGIS, реализованные на языке программирования Python.

Чтобы определить самый засушливый месяц, был получен временной график влажности за четыре месяца: май, июнь, июль и август 2015 года. Чтобы извлечь ежедневную статистику за весь рассматриваемый период, был применен алгоритм MergeAllDaysYear и инструмент из коллекции ArcToolbox – Band Collection Statistics. Алгоритм MergeAllDaysYear осуществляет компановку всех первоначальных файлов в одно многослойное изображение. Инструмент Band Collection Statistics позволяет извлечь данные из всех слоев изображение в виде таблицы в формате *.TXT. Для дальнейшей работы со статистикой таблица была импортирована в Microsoft Excel. Результат представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Временной график влажности корневой зоны почвы на глубине 100см за май, июнь, июль и август 2015 года

Из данного графика можно сделать вывод, что в июле происходит резкое падение показателей влажности почвы. Такой резкий скачок может быть причиной усыхания древостоев.

Для более точного проведения анализа динамики почвы установим, в какое время суток наблюдается минимальная влажность почвы, а в какое – максимальная. Так же проследим зависимость влажности корнеобитаемого слоя от влажности и температуры воздуха. Для этого построим график средних показателей за июль в течение суток. Для построения графика необходима предварительная обработка многослойных изображений с последующим извлечением данных.

Алгоритм `CalculateYearMonthStatistics` позволяет объединить все три действия (преобразование формата, извлечение необходимого слоя, подсчет статистики) в одно. Для применения алгоритма необходимо выбрать папку, в которой хранятся исходные файлы, месяц и год, по которым необходимо посчитать статистику, а также слой изображения, по которому будет произведен подсчет. В данном случае использовались слои 22, 24, 38, содержащие информацию о влажности почвы на глубине 100см, влажности воздуха, температуре воздуха соответственно. Поиск файлов, подходящих для обработки происходит по маске имени файла. После обработки получается однослойное изображение, каждый пиксель которого хранит информацию об усредненном значении за выбранный месяц.

После применения алгоритма `CalculateYearMonthStatistics` было получено:

- 8 изображений, отражающих средние значения влажности почвы за июль в определенное время суток;
- 8 изображений, отражающих средние значения влажности воздуха за июль 2015 года в течение суток;
- 8 изображений, отражающих средние значения температуры воздуха за июль 2015 года в течение суток.

Ввиду того, что полученные файлы хранят информацию обо всем мире, необходимо вырезать фрагмент карты с интересующей территорией с помощью набора инструментов `ArcToolbox`. Инструмент `Extract by Mask` позволяет выполнить обрезку изображения по маске. В качестве маски использовался `shape-файл` с пространственными данными хребта Хамар-Дабан. Для

применения инструмента необходимо выбрать изображение, которое необходимо обрезать, файл, который будет использован как маска для обрезки изображения и папку, в которую будет сохранен результат.

После совершения вышеуказанных действий данные о минимальных и максимальных значениях были перенесены в таблицу Microsoft Excel (таблица 2) для построения графика средних показателей за июль в течение суток. Также добавлены столбцы со средними значениями. По таблице 2 построены графики, представленные на рисунках 2 – 4.

Таблица 2 – Значения средних показателей влажности почвы, воздуха и температуры воздуха за июль 2015 в течение суток

Время съемки, ч	Влажность корне-обитаемого слоя, м3/м3			Температура воздуха, К			Влажность воздуха, м3/м3		
	MAX	MIN	MEAN	MAX	MIN	MEAN	MAX	MIN	MEAN
1	0,6671	0,1017	0,3106	290,91	282,07	286,66	0,6881	0,216	0,4508
4	0,6691	0,1029	0,3121	290,06	280,82	285,68	0,6928	0,2258	0,4612
7	0,6709	0,1035	0,3186	291,09	282,95	286,9	0,6906	0,2286	0,4604
10	0,6668	0,1007	0,3132	297,3	287,81	291,58	0,6812	0,2121	0,4493
13	0,6661	0,1001	0,3109	302,02	290,73	294,78	0,6759	0,2039	0,4415
16	0,6655	0,1	0,3092	301,79	291,03	295,07	0,6775	0,2069	0,4368
19	0,6653	0,1004	0,3089	297,11	288,7	292,56	0,6773	0,2108	0,4385
22	0,6659	0,1009	0,3096	292,12	284,12	288,09	0,6874	0,2133	0,446

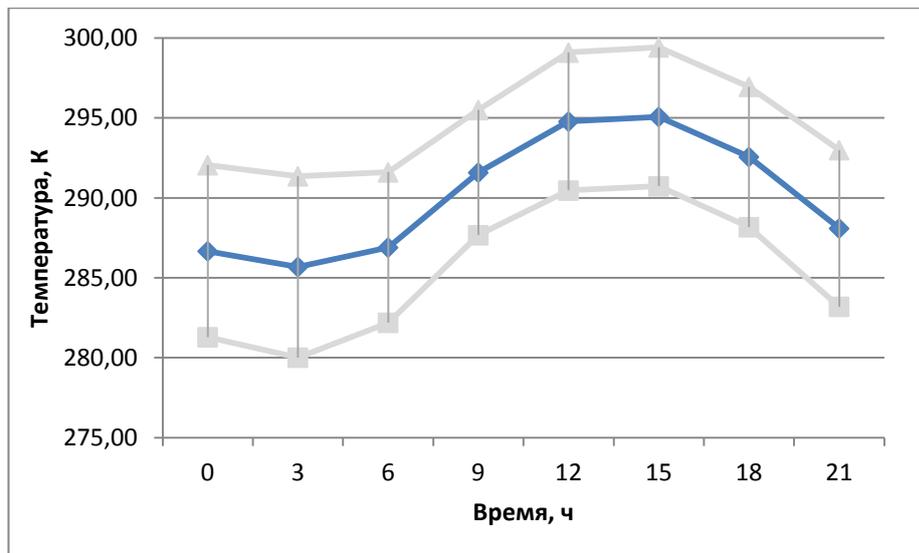


Рисунок 2 – Динамика температура воздуха в течение суток за июль 2015 года.

Серым цветом отмечена дисперсия

Из рисунка 2 видно, что максимальная температура воздуха наблюдается в 15 часов, после температура падает и минимум приходится на 3 часа.

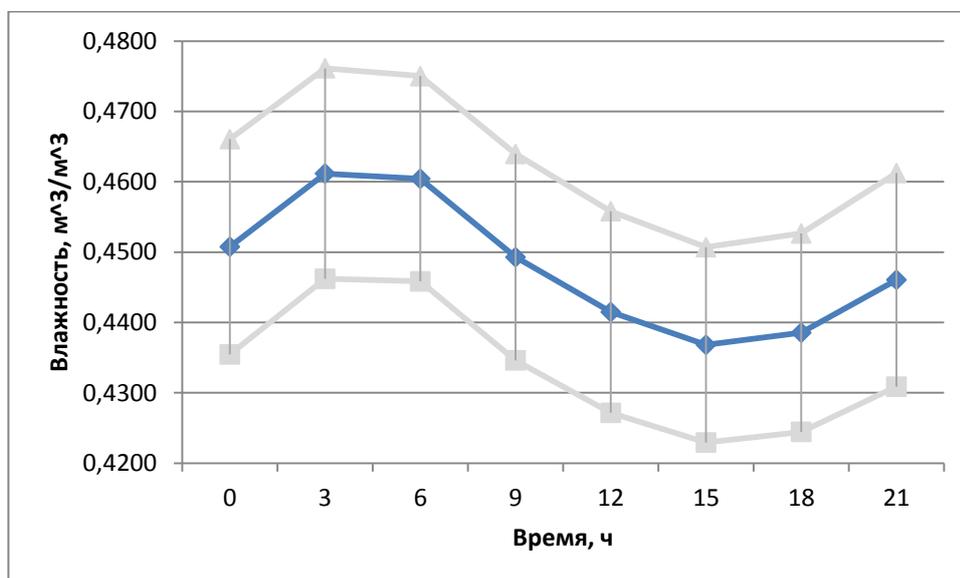


Рисунок 3 – Динамика влажности воздуха в течение суток за июль 2015 года.

Серым цветом отмечена дисперсия

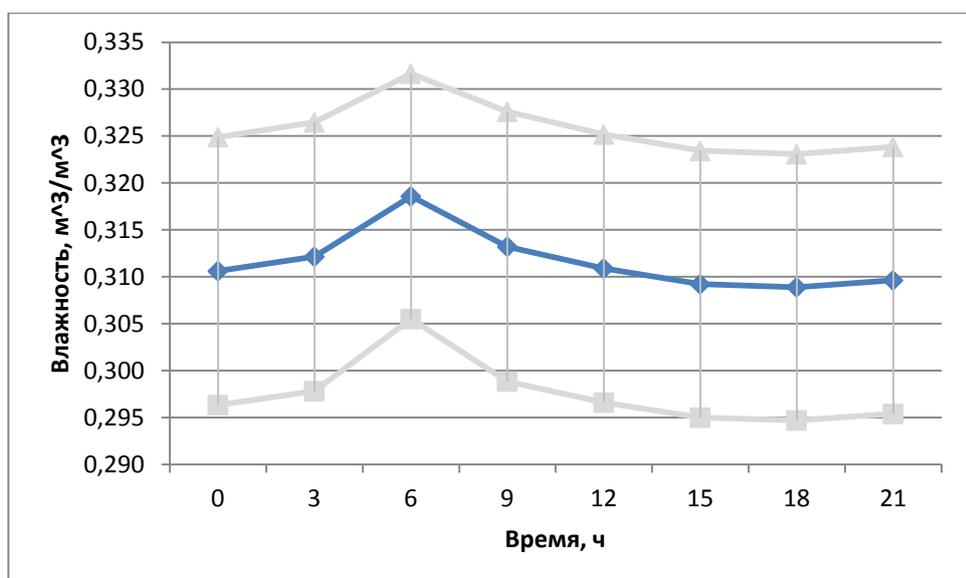


Рисунок 4 – Динамика влажности почвы в течение суток за июль 2015 года.

Серым цветом отмечена дисперсия

Из графика на рисунке 3 видно, что наибольшая влажность воздуха наблюдается в период с 3 до 6 часов, наименьшая – в 15 часов. Сравнивая графики влажности воздуха и почвы (рисунки 3 и 4), можно наблюдать некоторый сдвиг по фазе на несколько часов. При этом, влажность почвы изменяется более плавно, чем влажность воздуха, за исключением резкого повышения в 6 часов. Стоит отметить, что наименьшие показатели влажности и наибольшие значения температуры воздуха сосредоточены в той части территории, где находятся пробные площади Института леса СО РАН и восточнее (рисунок 5).

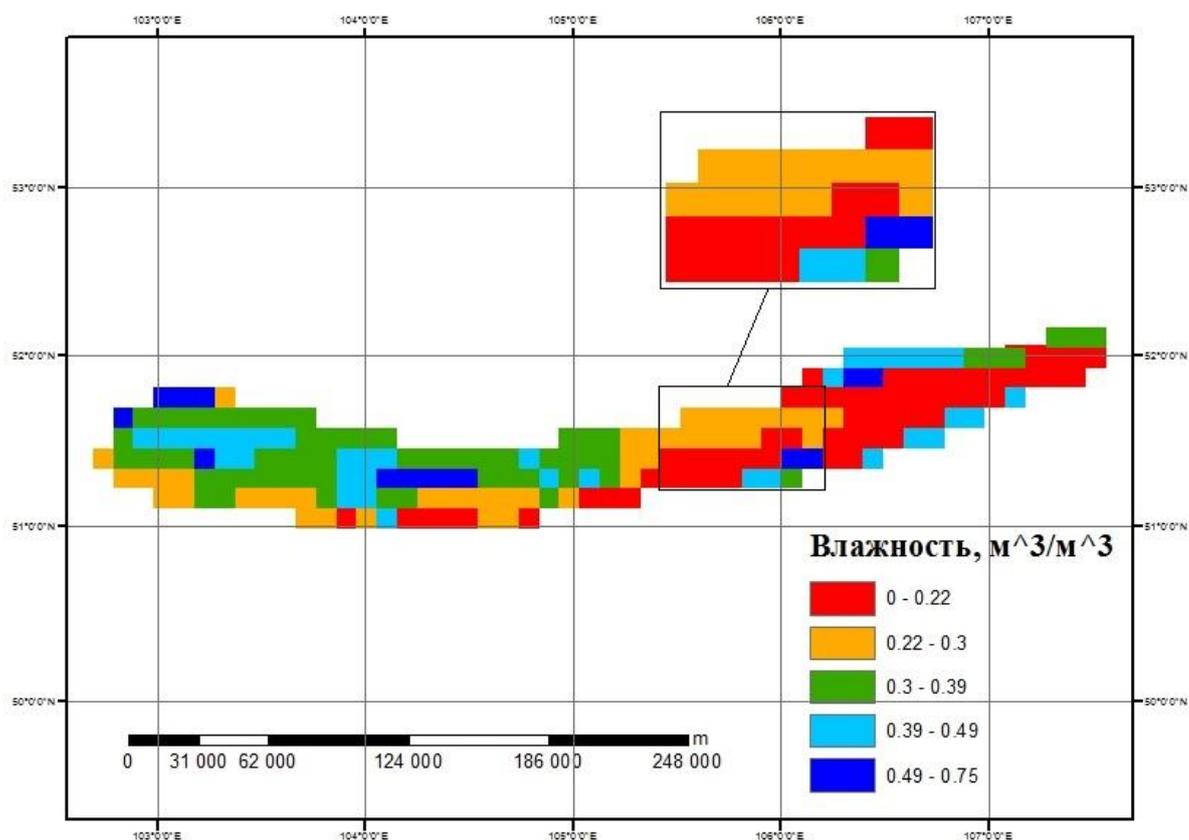


Рисунок 5 – Средняя влажность почвы исследуемой территории на 15 часов местного времени за июль 2015 года. Вырезка расположения основной зоны повреждений лесов Хамар-Дабана отмечена прямоугольником.

Далее был проведен анализ корреляционной зависимости исследуемых величин. Результат представлен в таблице 3. Между большинством величин наблюдается средняя или сильная (тесная) связь. Между влажностью воздуха и почвы существует положительная прямолинейная корреляция, это значит, что повышение/понижение значений одного, приведет к повышению/понижению значений второго. А вот между влажностью и температурой наблюдается отрицательная прямолинейная корреляция, значит при повышении температуры, влажность будет понижаться, а при понижении температуры, влажность повысится. Корреляционный анализ подтверждает наблюдения, описанные выше. Среднее значение корреляции между температурой воздуха и влажностью почвы равно – 0,65, ошибка коэффициента корреляции равна 0,09.

Таблица 3 – Корреляционная зависимость величин

		Влажность корнеобитаемого слоя, м ³ /м ³			Температура воздуха, К			Влажность воздуха, м ³ /м ³		
		MAX	MIN	MEAN	MAX	MIN	MEAN	MAX	MIN	MEAN
Влажность корнеобитаемого слоя, м ³ /м ³	MAX	1	0,954	0,897	-0,648	-0,688	-0,696	0,769	0,914	0,924
	MIN	0,954	1	0,758	-0,831	-0,855	-0,859	0,897	0,982	0,948
	MEAN	0,897	0,758	1	-0,397	-0,404	-0,436	0,506	0,717	0,749
Температура воздуха, К	MAX	-0,648	-0,831	-0,397	1	0,983	0,992	-0,948	-0,855	-0,811
	MIN	-0,688	-0,855	-0,404	0,983	1	0,997	-0,973	-0,857	-0,859
	MEAN	-0,696	-0,859	-0,436	0,992	0,997	1	-0,973	-0,866	-0,861
Влажность воздуха, м ³ /м ³	MAX	0,769	0,897	0,506	-0,948	-0,973	-0,973	1	0,901	0,901
	MIN	0,914	0,982	0,717	-0,855	-0,857	-0,866	0,901	1	0,926
	MEAN	0,924	0,948	0,749	-0,811	-0,859	-0,861	0,901	0,926	1

Дальнейшая работа была произведена с данными на 6 и 15 часов (наименьшие и наибольшие показатели в течение суток). Для анализа был взят период с апреля по октябрь. Выбранный период выходит за временные рамки вегетационного периода, так как в апреле в некоторых регионах рассматриваемой территории уже возможны движения снежных масс, а к концу октября большая часть территории находится под снежным покровом. Для получения карт был применен вышеописанный алгоритм CalculateYearMonthStatistics с извлечением слоя номер 22 и инструмент Extract by Mask. В результате было получено 14 изображений. Для наглядности, значения влажности (м³/м³) были распределены на 5 классов, общих для всех карт. Распределение классов представлено в легенде на рисунке 6 и относится ко всем последующим рисункам с изображением карт (рисунки 7 – 20).



Рисунок 6 – Легенда для карт, отражающих средние месячные значения влажности

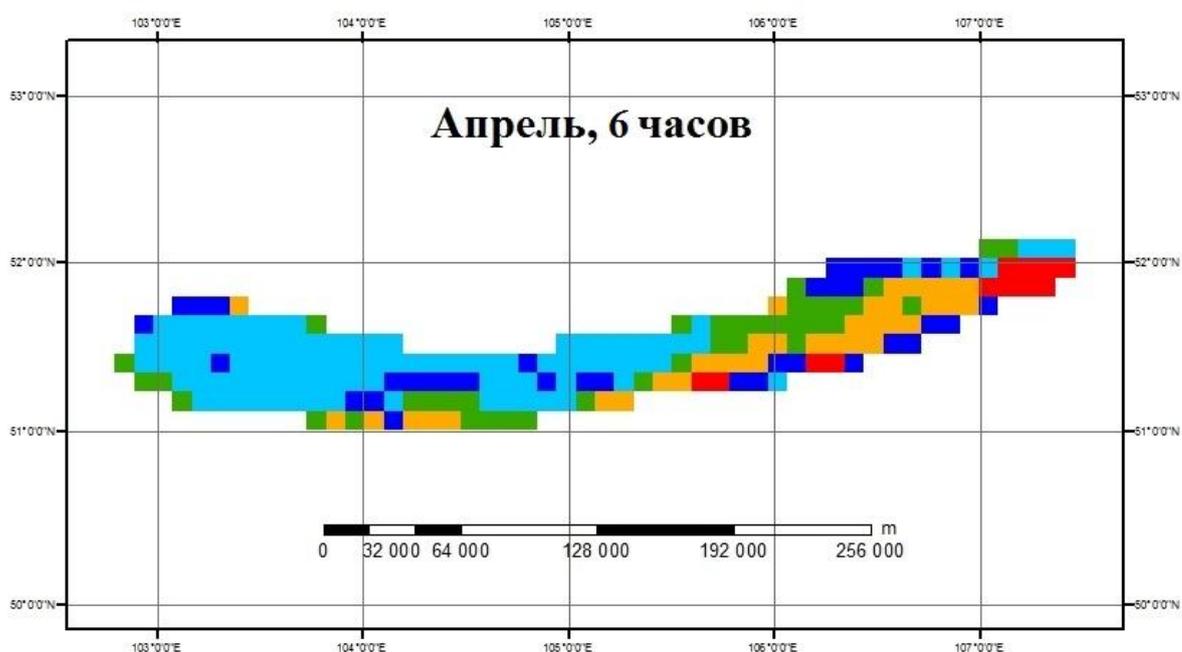


Рисунок 7 – Средние значения влажности за апрель 2015 года на 6 часов по местному времени

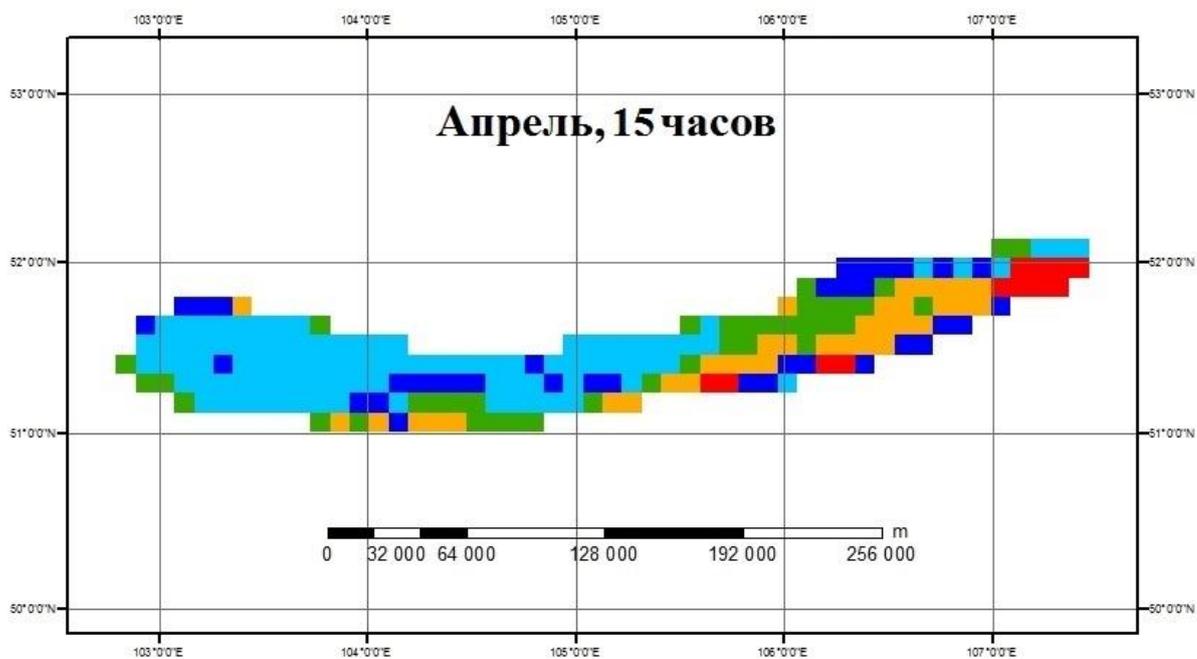


Рисунок 8 – Средние значения влажности за апрель 2015 года на 15 часов по местному времени

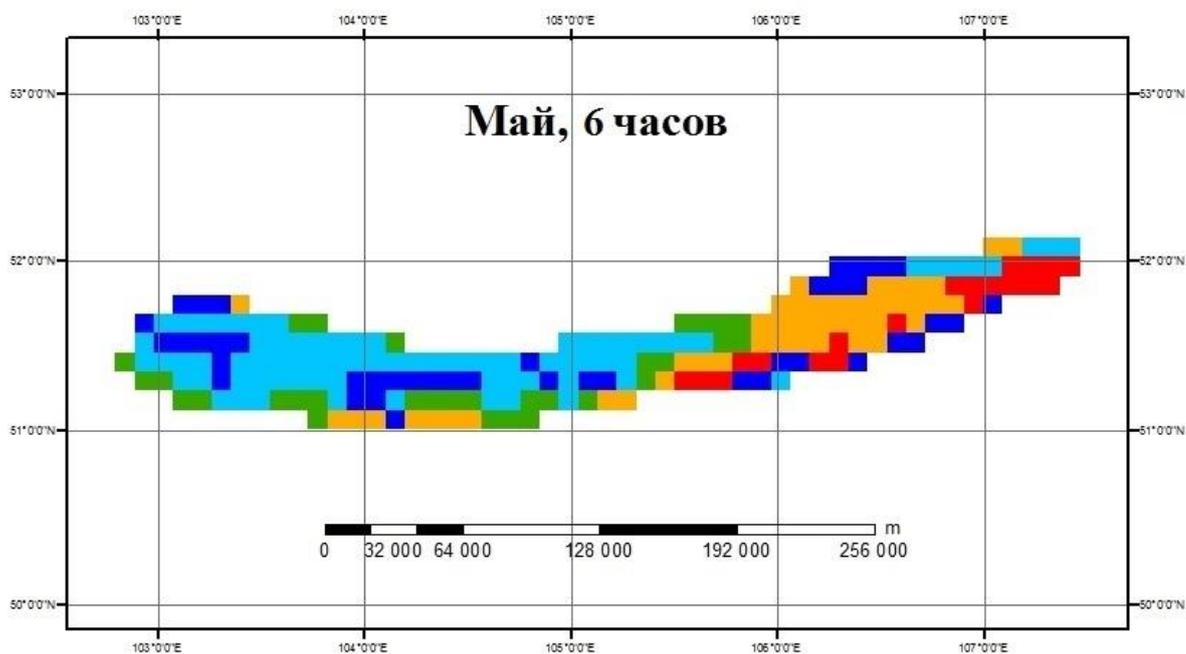


Рисунок 9 – Средние значения влажности за май 2015 года на 6 часов по местному времени

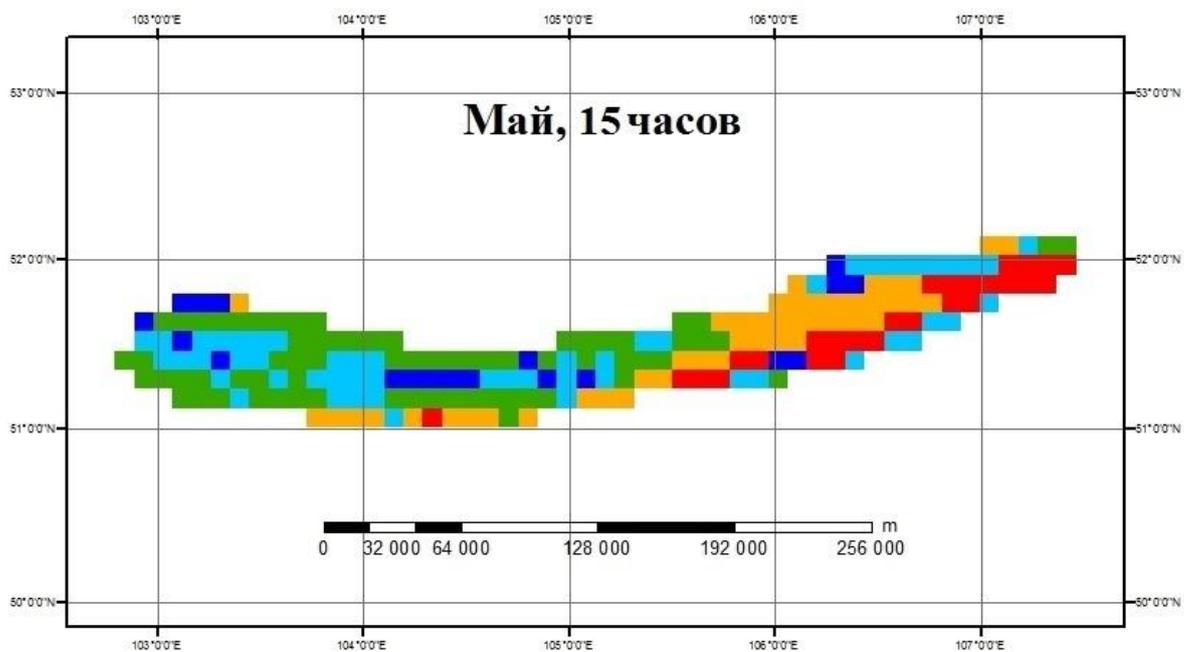


Рисунок 10 – Средние значения влажности за май 2015 года на 15 часов по местному времени

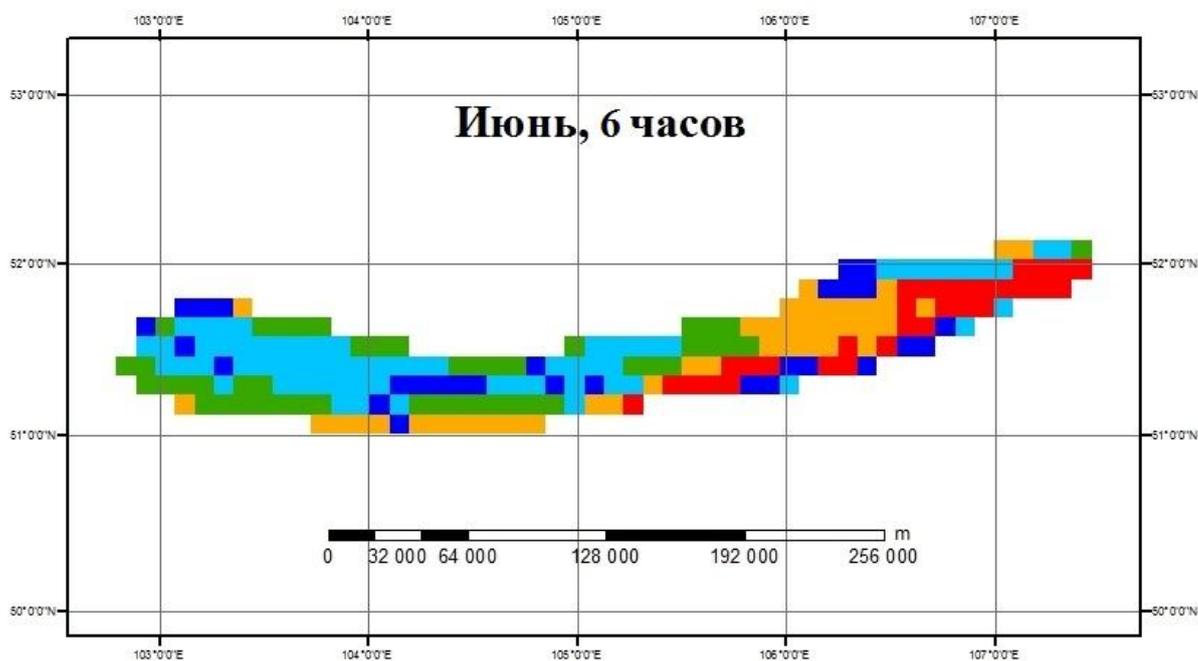


Рисунок 11 – Средние значения влажности за июнь 2015 года на 6 часов по местному времени

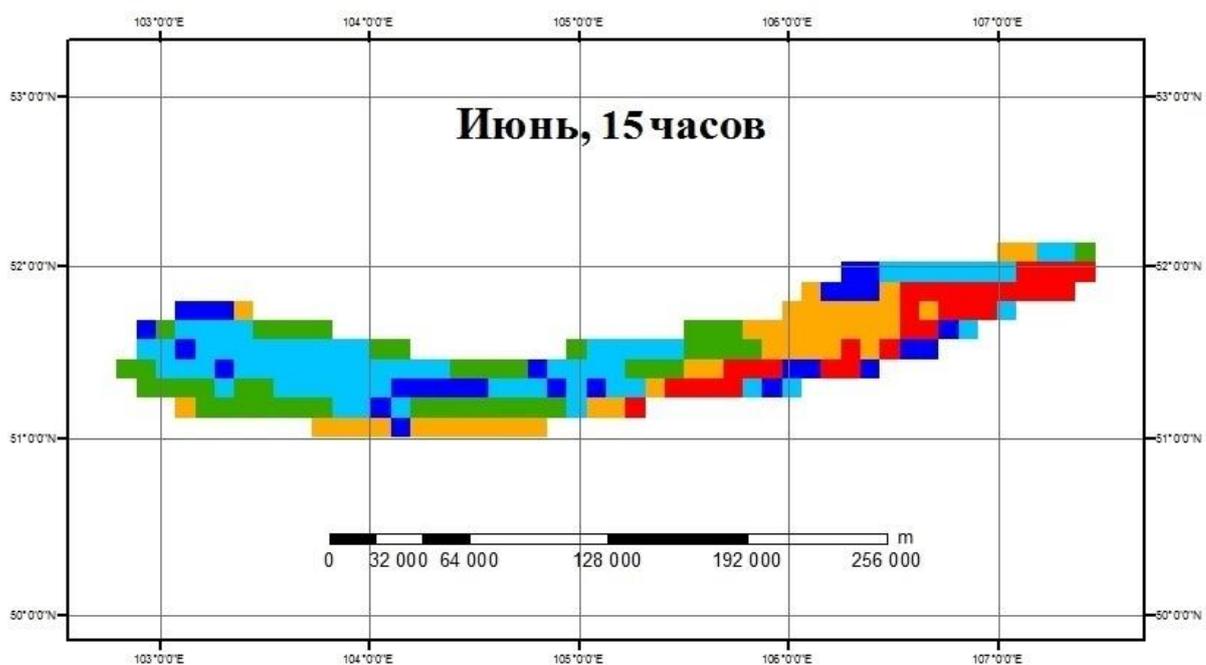


Рисунок 12 – Средние значения влажности за июнь 2015 года на 15 часов по местному времени

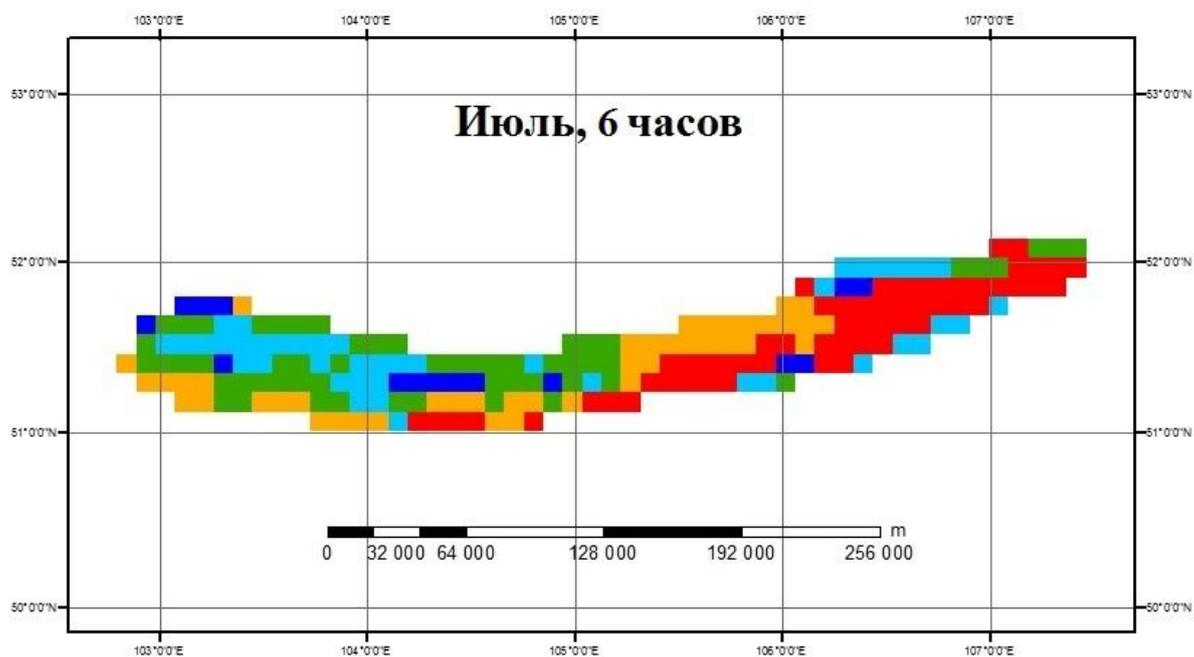


Рисунок 13 – Средние значения влажности за июль 2015 года на 6 часов по местному времени

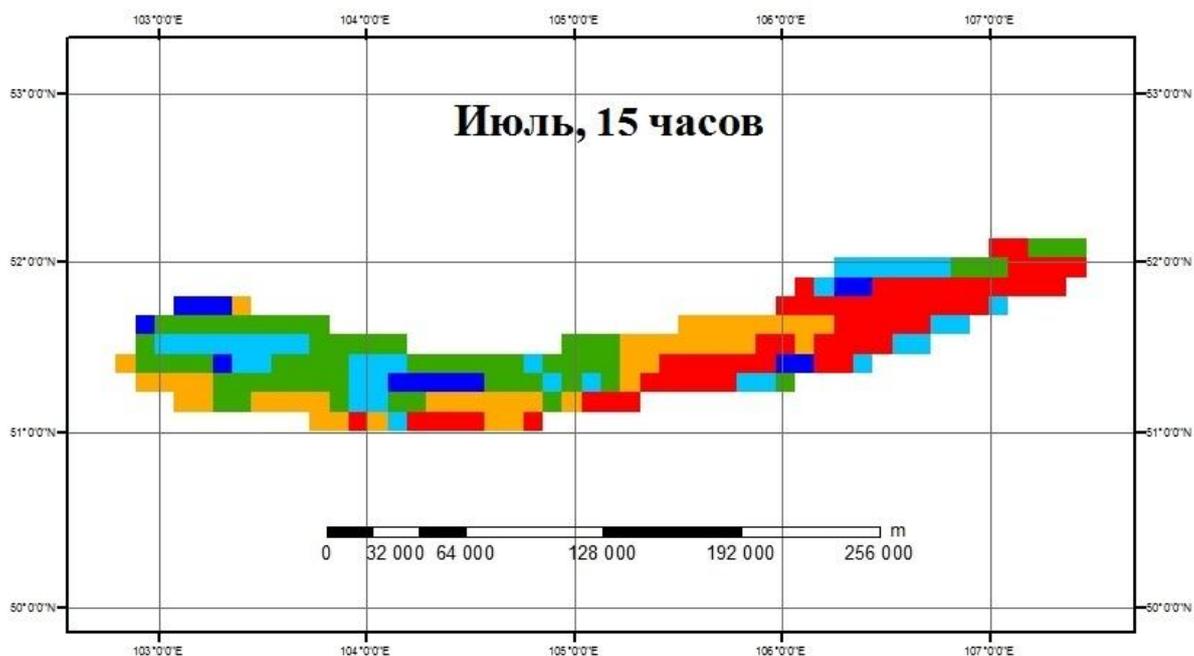


Рисунок 14 – Средние значения влажности за июль 2015 года на 15 часов по местному времени

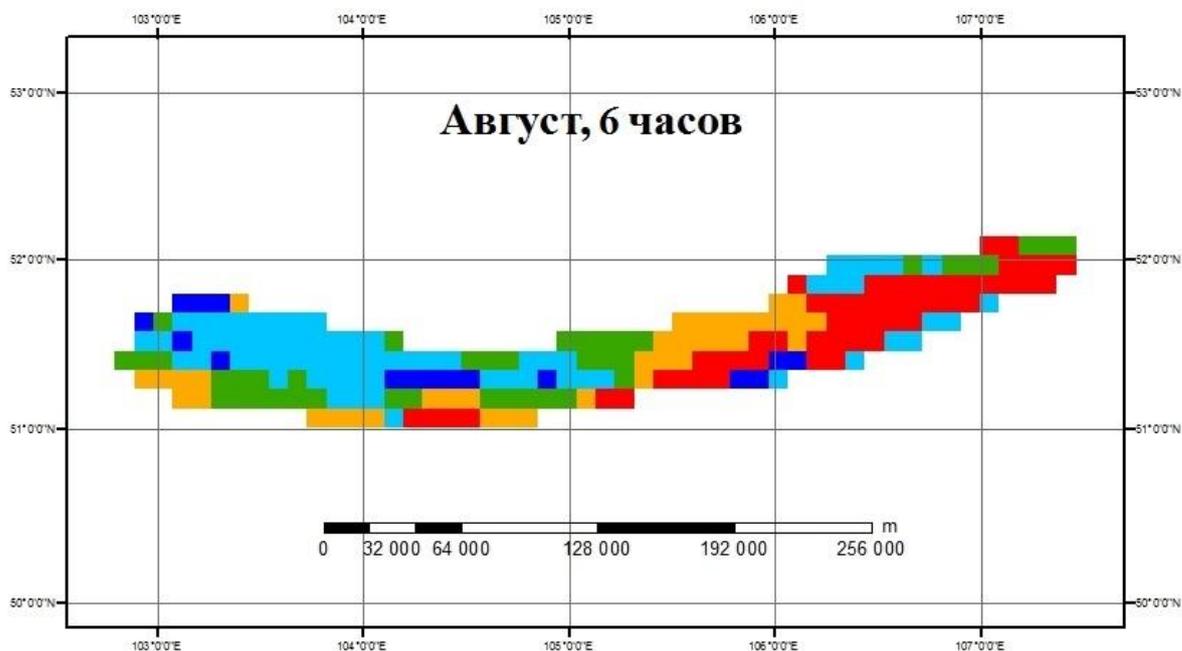


Рисунок 15 – Средние значения влажности за август 2015 года на 6 часов по местному времени

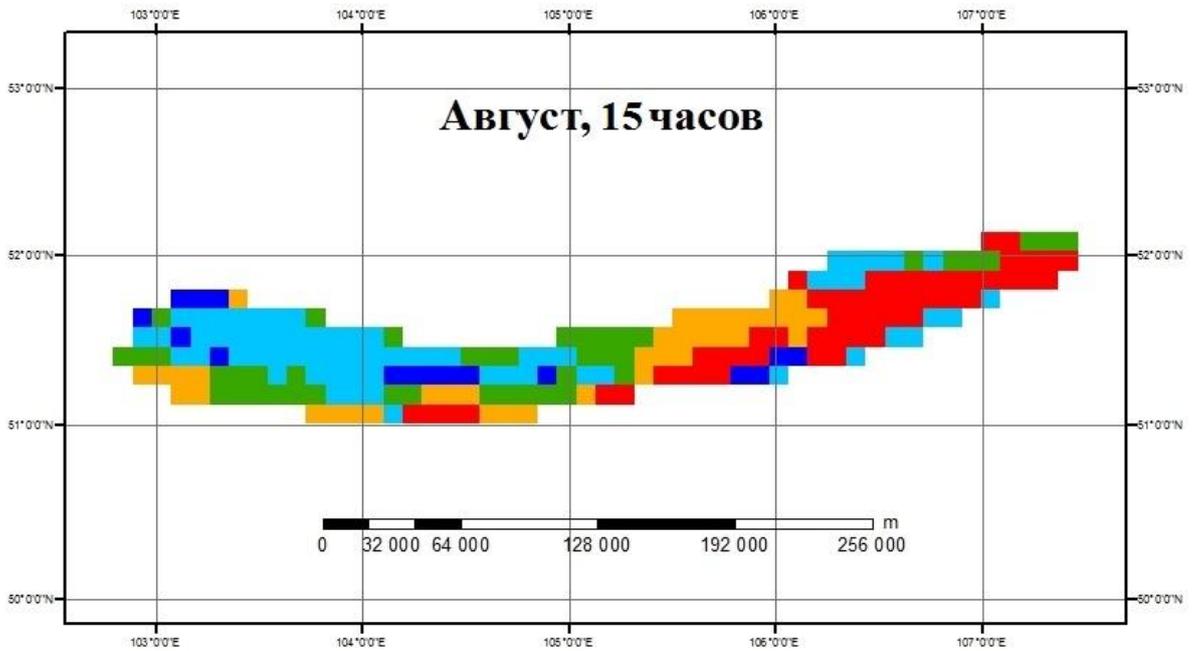


Рисунок 16 – Средние значения влажности за август 2015 года на 15 часов по местному времени

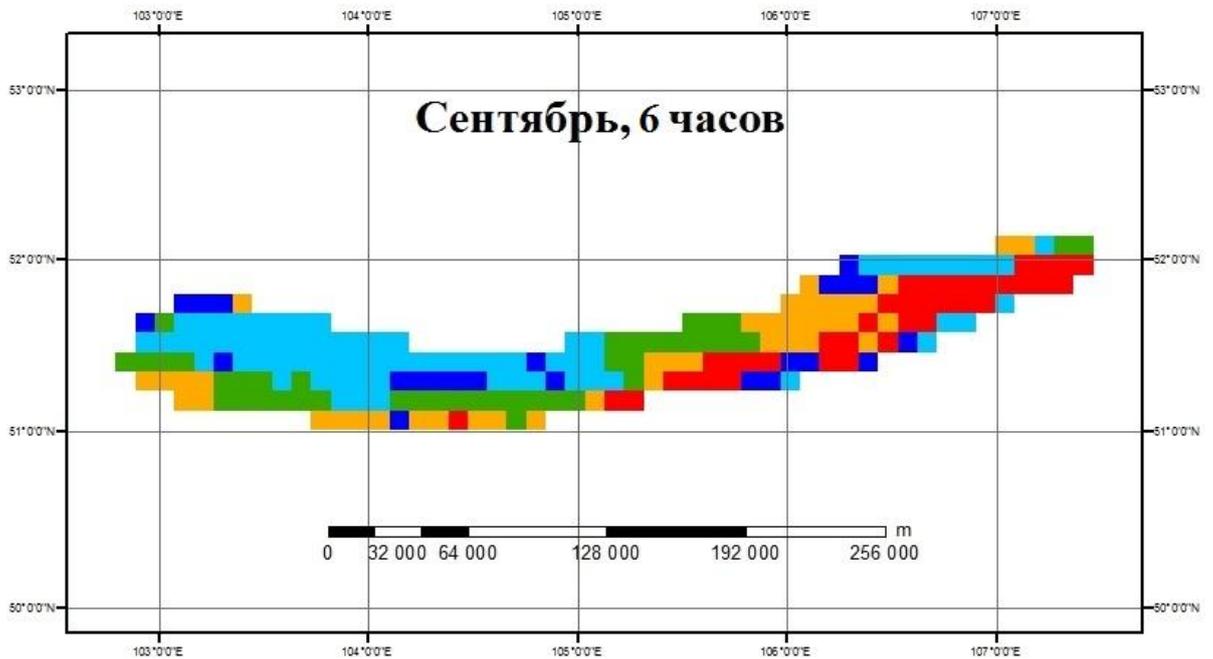


Рисунок 17 – Средние значения влажности за сентябрь 2015 года на 6 часов по местному времени

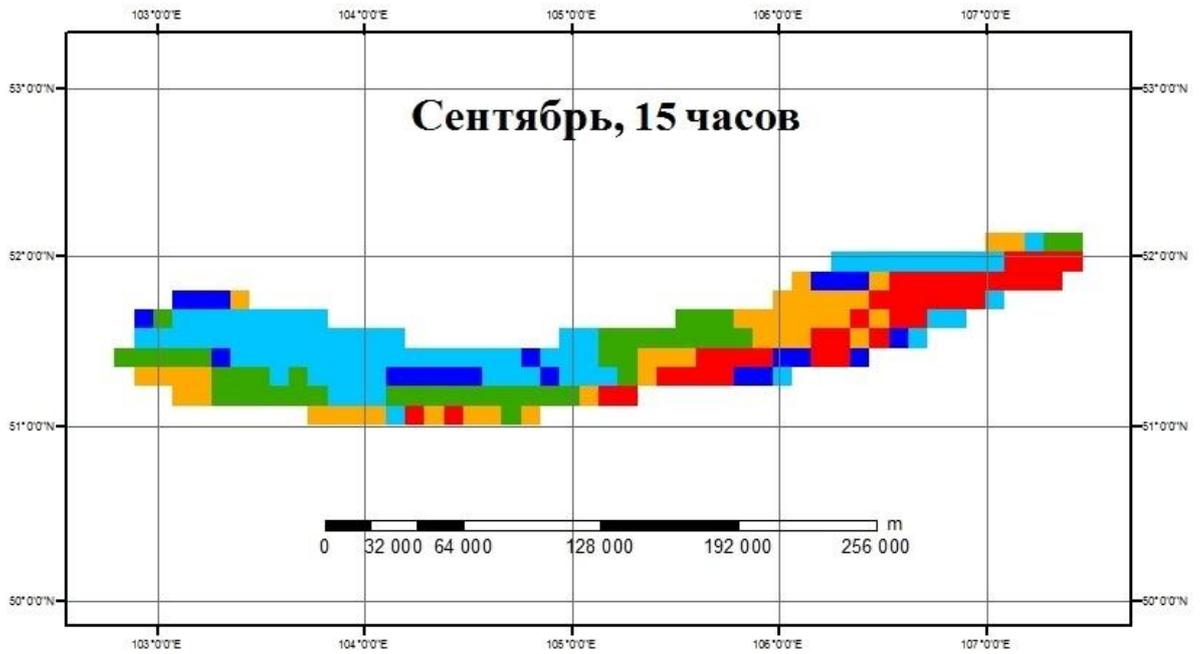


Рисунок 18 – Средние значения влажности за сентябрь 2015 года на 15 часов по местному времени

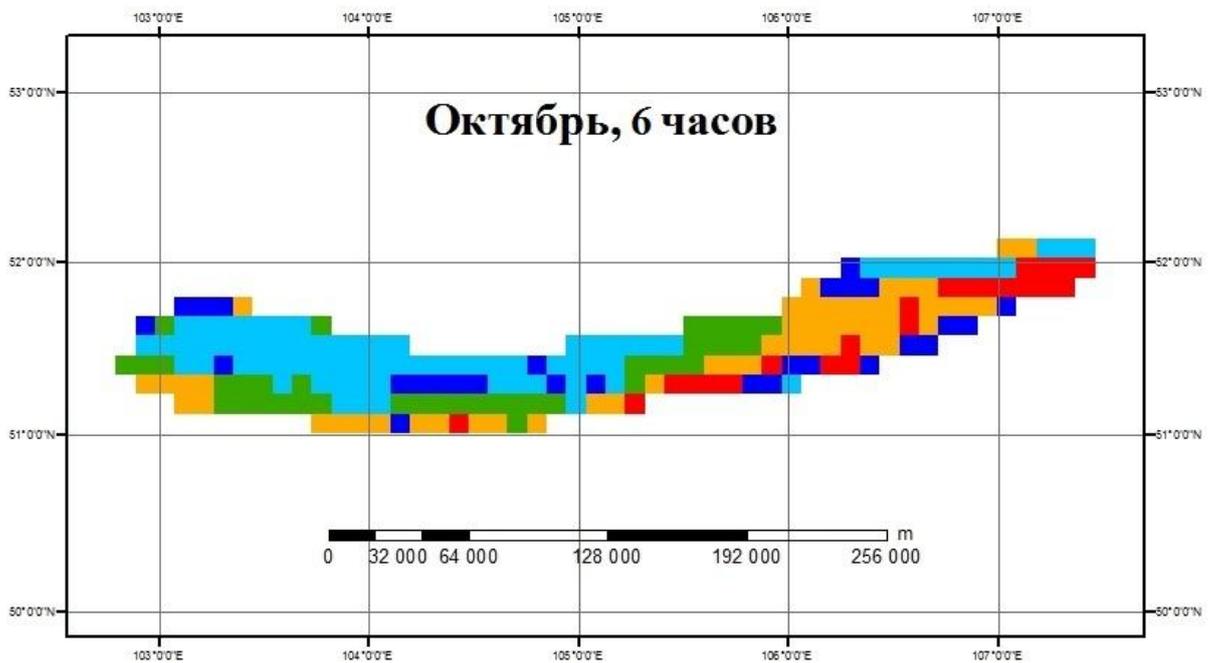


Рисунок 19 – Средние значения влажности за октябрь 2015 года на 6 часов по местному времени

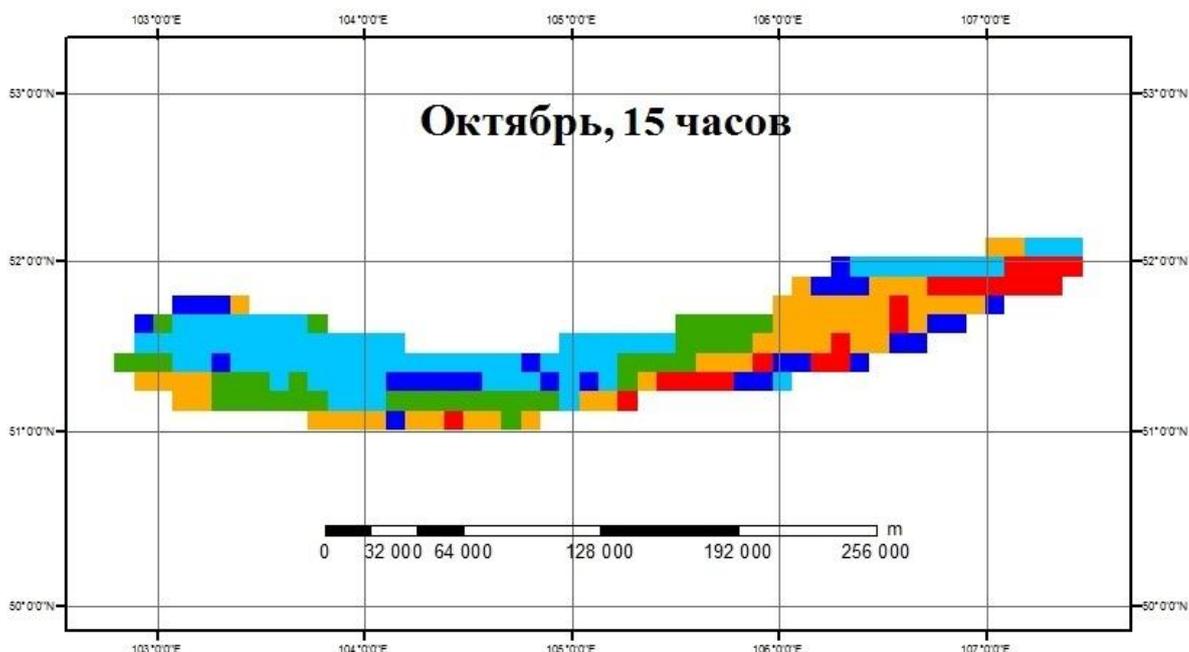


Рисунок 20 – Средние значения влажности за октябрь 2015 года на 15 часов по местному времени

Согласно рисункам 7, 8, в апреле влажность почв на территории Хамар-Дабана выше среднего, за исключением нескольких точек в восточной части. Разница между ночными и дневными показателями невелика и по графикам не заметна. В мае (рисунки 9, 10) влажность почв понижается. В центральной и западной частях хребта можно увидеть разницу между ночными и дневными показателями, они понижаются до средних значений. В восточной части значения ниже средних. В июне (рисунки 11, 12) все большие площади восточной части территории имеют минимальные значения влажности. Как было выявлено ранее, июль самый засушливый месяц. Половина территории имеет показатели со значениями ниже среднего, около 1/3 территории с минимальными значениями влажности (рисунки 13,14). В августе изменения в показателях влажности в восточной части Хамар-Дабана совсем незначительные (рисунки 15, 16). В сентябре влажность корнеобитаемого слоя несколько восстанавливается, но в восточной части влажность остается ниже средних значений (рисунки 17, 18), так же, как и в октябре (рисунки 19,20). Несмотря на дожди в конце июля – августе, восстановление влажности почв

Хамар-Дабана происходит медленно, что, вероятно, влечет усыхание древостоев.

Несомненно, усыхание древостоев обусловлено взаимодействием множества факторов, в том числе и климатических. Низкие значения влажности корнеобитаемого слоя приводят к дефициту водного питания и последующему ослаблению древостоев. Одним из таких примеров является пихта сибирская – одна из наиболее чувствительных к недостатку влаги пород. Как было отмечено выше, она является одной из лесообразующих пород на территории Хамар-Дабана. Усыхающие пихтовые деревья характеризуются уменьшением продуктивности, преждевременным старением, уменьшением линейного и радиального приростов, уменьшением роста побегов, хлорозами, некрозами и преждевременным опалом хвои, возникновением стволовых гнилей, нарушением репродуктивных функций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные микроволнового зондирования со спутника SMAP (Soil Moisture Active Passive) позволяют выполнять анализ влажности почвы в пределах корнеобитаемого слоя древесных растений, а также температуры и влажности воздуха.

В ходе работы исследована временная динамика влажности почв лесов Прибайкалья (хр. Хамар-Дабан) в течение вегетационного периода 2015 г. Установлено, что минимум влажности наблюдается в июле.

Прослежена сравнительная динамика влажности почв, температуры и влажности воздуха. Выявлены количественные различия в суточной динамике указанных показателей. Анализ корреляционной зависимости показал, что между влажностью почвы и температурой воздуха существует значимая отрицательная зависимость ($r = -0.65$).

Установлено, что максимальное усыхание древостоев наблюдается в зоне минимальных значений влажности почв и максимальной температуры воздуха.

В перспективе, полученные в ходе работы данные могут быть использованы для дальнейшего анализа усыхания древостоев как в Прибайкалье, так и других регионах Сибири.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Известия [Электронный ресурс] : науч.журн. / Иркутский гос.ун-т. – Электрон. журн. – Бажина Е.В. - 2010. – Режим доступа: <http://isu.ru/izvestia>.
- 2 NASA Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology [Электронный ресурс] : NASA Focused on Sentinel as Replacement for SMAP Radar. SMAP news. – Режим доступа: <http://smap.jpl.nasa.gov/news/>.
- 3 Научно-информационный журнал Биолайф [Электронный ресурс] : Водный режим почв, его регулирование. – Режим доступа: <http://biofile.ru/bio/4187.html>.
- 4 Семенов, В.А Гидрология в решении экологических проблем [Электронный ресурс] : электронный журнал – 1997. – Режим доступа: <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/382.html>.
- 5 Воробьева, А. А. Дистанционное зондирование Земли: учебное пособие / А. А. Воробьева. – Санкт-Петербург: 2012. – 168с.
- 6 SMAP Level 4 Surface Root Zone Soil Moisture Data Product Algorithm Theoretical Basis Document: Executive Summary / Rolf Reichle [and others]. – 2015. – 52 с.
- 7 Ставников, Д. Ю. Факторы деструкции темнохвойной тайги Хамар-Дабана (Южное Прибайкалье) : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 10.10.13 / Ставников Дмитрий Юрьевич. – Улан-Удэ, 2013. – 21 с.
- 8 Курнаев, С. Ф. Лесорастительное районирование СССР : справочник / С. Ф. Курнаев; под ред. Л. Ф. Правдина. – Москва : Наука, 1973. – 203 с.
- 9 ArcGIS Resources [Электронный ресурс] : руководство пользователя ArcGIS. – Режим доступа: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#//00qn0000013t000000>.
- 10 Геопортал NSIDC : научные данные для исследований. // National Snow and Ice Data Center [сайт]. – Колорадо, Боулдер, 2016. – Режим доступа: <http://nsidc.org/>.

11 СТО 4.2 – 07 – 2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности: стандарт организации. – Красноярск, 2014. – 60 с.