

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

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

09.03.02 - Информационные системы и технологии

Характеристика экосистемной и климатической изменчивости территории  
севера Средней Сибири

Руководитель	_____	доцент, канд. техн. наук	А.В. Рубцов
	подпись, дата		
Выпускник	_____		Д.Е. Устинов
	подпись, дата		
Нормоконтролер	_____		Е.В. Федотова
	подпись, дата		

Красноярск 2016

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

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме бакалаврской работы**

Студенту Устинову Денису Егоровичу

Группа КИ12-16Б Направление (специальность) 09.03.02

Информационные системы и технологии

Тема выпускной квалификационной работы: Характеристика экосистемной и климатической изменчивости территории севера Средней Сибири.

Утверждено приказом по университету № 7749/с от 06.06.2016 г.

Руководитель ВКР: А.В. Рубцов, канд. техн. наук, доцент базовой кафедры геоинформационных систем Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета

Исходные данные для ВКР: границы водосборных бассейнов рек, растровые спутниковые данные временной динамики вегетационного индекса NDVI, фенологических дат и классификации растительности TerraNorthe RLC2011.

Перечень разделов ВКР: Введение; Территория исследования; Исходные данные; Характеристика водосборных бассейнов; Статистика NDVI и фенофаз по классам растительности; Заключение; Список использованных источников.

Перечень графического материала: слайды презентации.

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_  
подпись

А.В. Рубцов

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_  
подпись

Д.Е. Устинов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа по теме «Характеристика экосистемной и климатической изменчивости территории севера Средней Сибири» содержит 41 страницы текстового документа, 16 использованных источников.

СПУТНИКОВАЯ СЪЕМКА, MODIS, NDVI, ФЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАТЫ, ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ, ТРЕНДЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ.

Территория исследования – 23 бассейна рек севера Красноярского края, впадающих в р. Енисей.

Цель работы состоит в составлении характеристики территории исследования с помощью статистического анализа временной динамики показателей NDVI и фенологических дат (начала, максимума, конца и длительности вегетационного сезона) по ежегодным данным съемки MODIS для северных территорий бассейна р. Енисей за период времени с 2001 по 2013 годы отдельно для каждого водосборного бассейна и в пределах распространения индивидуальных классов растительности совокупности всех бассейнов.

В результате выполнения работы были рассчитаны характеристики NDVI и фенологических дат в виде слоев данных ГИС, карт и графиков временной динамики этих показателей, как для каждого водосборного бассейна, так и в пределах распространения основных типов растительности северных территорий бассейна р. Енисей, сделана оценка пространственного распределения исследуемых показателей.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Территория исследования .....	7
2 Исходные данные .....	8
2.1 Вегетационный индекс NDVI .....	8
2.2 Показатели фенологического цикла растительности по данным MODIS ..	10
2.3 Классификация растительности TerraNorte RLC2011 .....	11
2.4 Обработка данных NDVI.....	12
2.5 Процесс обработки фенологических данных MCD12Q2.....	15
3 Характеристика водосборных бассейнов .....	16
3.1 Вычисление статистики для NDVI.....	16
3.2 Вычисление статистики для фенологических дат .....	20
3.3 Расчет карт трендов .....	29
4 Статистика NDVI и фенофаз по классам растительности .....	31
Заключение .....	39
Список использованных источников .....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования, направленные на мониторинг и моделирование биосферных процессов, требуют точной информации, относящейся к пространственной – временной динамике экосистем. Фенология растений оказывает влияние на многие процессы такие, как циркуляция углерода [1], расчет альбедо поверхности земли [2], круговорот питательных веществ [3], взаимодействие земли с атмосферой [4]. В основе фенологического развития растений лежат наследственная закреплённая ритмичность и периодичность физиологических процессов, названная биологическими или физиологическими часами. Однако сроки начала, окончания и длительности вегетационного сезона зависят от сезонных изменений погоды. Влияние изменения климата на фенологию растения была изучена многими исследователями, включая Е.Е. Cleland [5].

Изучение особенностей различных экосистем актуально всегда, и оно основывается на результатах многолетнего пространственно-временного анализа, выполняемого в рамках данной работы для обширных территорий севера Средней Сибири. Для мониторинга сезонных изменений экосистем на больших территориях требуется привлечение материалов спутниковых съемок. Круг вопросов, решение которых возможно по космическим снимкам, очень широк и включает в себя мониторинг фенологического состояния. Актуальной задачей является определение количественных изменений ежегодных показателей нормализованного относительного индекса растительности NDVI в сочетании с характеристикой ежегодной динамики дат начала и конца вегетационного сезона за последние десятилетия по причине значительных климатических изменений этого периода.

Территории исследования – совокупность 23-х водосборных бассейнов, образованных реками-притоками р. Енисей от 57° с.ш. до 70° с.ш. и состоящих из мозаичного сочетания различных типов растительности.

Источниками данных являются растровые данные периодической съемки MODIS в виде рассчитанного нормализованного относительного индекса растительности (NDVI), параметров (дат) вегетационного сезона (MCD12Q2) и классификации растительности TerraNorte RLC2011. Данные получены из международных архивов спутниковой информации с открытым доступом, такие как национальный архив спутникового мониторинга Земли (USGS Reverb) [6].

Цель работы – состоит в составлении характеристики территории исследования с помощью статистического анализа временной динамики показателей NDVI и ключевых фенологических дат (начала, максимума, конца и длительности вегетационного сезона) по ежегодным данным съемки MODIS для северных территорий бассейна р. Енисей за период времени с 2001 по 2013 годы отдельно для каждого водосборного бассейна и в пределах распространения индивидуальных классов растительности совокупности всех бассейнов.

Задачи работы:

- подготовить исходные растровые слои NDVI (MOD13Q1), фенологических дат (MCD12Q2 - начало, максимум, конец и длина вегетационного сезона) и классификации растительности (TerraNorte RLC 2011) по данным съемки MODIS для расчета необходимых характеристик за период с 2001 по 2013 гг.;

- разработать алгоритмы статистического анализа (средние величины, стандартное отклонение, линейный тренд, корреляция между показателями) подготовленных данных;

- рассчитать базовые статистические показатели пространственно-временного распределения значений индекса NDVI и фенологических дат для территории исследования, составить и проанализировать карты этих распределений;

- составить сравнительную характеристику статистических показателей для каждого водосборного бассейна и в пределах распространения индивидуальных классов растительности совокупности всех бассейнов;

- определить специфичные и территориально - обобщенные закономерности многолетней динамики NDVI и фенологических дат.



## 1 Территория исследования

Районирование территории исследования основано на бассейновом подходе с рассчитанными границами ключевых водосборных бассейнов для 23-х притоков р. Енисей, расположенных севернее 57 параллели северного полушария (таблица 1). Пространственный охват территории исследования - от 57° до 70° с. ш. и от 96° до 109° в.д. Суммарная площадь всех исследуемых водосборных бассейнов составляет 1 020 053,18 км<sup>2</sup>.

Таблица 1 – Площадная характеристика водосборных бассейнов

№	Название реки	Длина реки, км	Площадь водосборного бассейна (по метаданным ЦРМ), км <sup>2</sup>	Площадь водосборного бассейна (по википедии), км <sup>2</sup>
1	Бахта	498	35898,20	35500
2	Большая Хета	646	20799,62	20700
3	Большой Пит	415	21598,18	21700
4	Вороговка		3757,62	
5	Гарёвка	99	926,87	900
6	Гравийка	45	323,42	337
7	Дубчес	433	14661,31	15300
8	Дудинка	200	5705,16	5970
9	Елогуй	464	25393,38	25100
10	Кас	464	11816,19	11200
11	Комса	121	1666,66	1600
12	Курейка	888	46600	44700
13	Малая Хета	298	5942,46	6430
14	Мироедиха	46	552,13	
15	Нижняя Тунгуска	2989	475435,99	473000
16	Подкаменная Тунгуска	1865	238699,41	240000
17	Сым	694	31327,02	61600
18	Большая Игарка		1662,36	
19	Сухая Дудинка	150	1903,08	2060
20	Сухая Тунгуска		7165	

## Продолжение таблицы 1

№	Название реки	Длина реки, км	Площадь водосборного бассейна (по метаданным ЦРМ), км <sup>2</sup>	Площадь водосборного бассейна (по википедии), км <sup>2</sup>
21	Турухан	639	35726,20	35800
22	Фокина	115	342,55	1680
23	Хантайка	174	32150,27	30700
	Итого		1020053,18	1034277

Границы водосборов до 60° с.ш. рассчитывались функцией гидрологического анализа (Flow Direction и Watershed, ArcGIS), примененного к растровой цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM (Shuttle radar topographic mission, разрешение 90 м, [7]). Основные площадные характеристики для каждого водосбора были рассчитаны в ArcGIS и указаны в таблице 1.

Водосборные бассейны севернее 60° с.ш. рассчитывались по изолиниям топографической модели местности с масштабом от 1:500 000 до 1:100 000.

Как видно из таблицы 1 – исследуемые водосборные бассейны имеют различную площадь, их границы показаны на рисунке 1.

## 2 Исходные данные

Источниками данных являются растровые данные: классификации растительности TerraNorte RLC2011, многолетние данные нормализованного разностного индекса растительности (NDVI), параметры (даты) начала, конца, пика и длины вегетационного сезона (MCD12Q2).

### 2.1 Вегетационный индекс NDVI

Вегетационный индекс нормированной разности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) - простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным

индексом) [8]. NDVI - один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова.

NDVI вычисляется по следующей формуле (1):

$$NDVI = \frac{NIR+RED}{NIR-RED}, \quad (1)$$

где NIR - отражение в ближней инфракрасной области спектра,

RED - отражение в красной области спектра.

Согласно этой формуле, NDVI в определенной точке изображения равен разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей.

Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра (0,6-0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,7-1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной [8]. Алгоритм расчета NDVI встроен практически во все распространенные пакеты программного обеспечения, связанные с обработкой данных дистанционного зондирования (Arc View Image Analysis, ERDAS Imagine, ENVI, ErdMapper, Scanex MODIS Processor, ScanView и др.).

В работе были использованы данные NDVI MOD13Q1 – набор файлов, состоящий из 12 слоёв данных спутника MODIS (Terra), которые представлены в виде тайлов по 10° по широте и долготе, в синусоидальной проекции с пространственным разрешением 250 м [9]. В каждом файле данных имеется несколько слоев, из которых были использованы: данные NDVI (250m 16 days

NDVI), коды качества пикселей (250m 16 days VI Quality detailed QA) и знаки надёжности пикселей (250m 16 days pixel reliability summary QA) [9].

## **2.2 Показатели фенологического цикла растительности по данным MODIS**

MODIS Land Cover Dynamics (MCD12Q2) – набор данных, который содержит даты фенологических циклов с глобальным покрытием. Кроме того, MCD12Q2 содержит информацию об улучшенном вегетационном индексе (EVI), рассчитанного по данным отражательной способности поверхности в каждом пикселе [10]. В MCD12Q2 входят данные о начале роста фитомассы растительности, зрелости (вегетационный максимум) и окончания вегетационного сезона. MCD12Q2 v005 использует входные данные Terra и Aqua MODIS [10].

Алгоритм распознавания смены фенофаз растительности основан на анализе временных серий EVI, рассчитываемого с использованием функции BRDF-NBAR (nadir bidirectional reflectance distribution function - adjusted reflectance [11], в которой минимизированы помехи от облаков и атмосферных аэрозолей. В новой версии NBAR рассчитывается с 8-дневным шагом по данным с 16-дневным перекрытием. Добавочно к EVI, алгоритм MCD12Q2 использует данные MODIS о температуре подстилающей поверхности и наличии снега в каждом пикселе. Итоговый шаг в обработке временных рядов EVI – сглаживание фильтром локальной медианы с плавающим окном [12]. Даты смены фенозы определяются на основании моделирования временных вариации EVI функцией сигмовидного типа для каждого этапа фенологического цикла отдельно [13]. Более подробно о работе алгоритма MCD12Q2 написано в статье S. Ganguly [14].

Версия MCD12Q2 v005 содержит данные с 2001 по 2012 годы, а в версии 006 с 2013 г. и продолжается по текущий год [10].

Характеристики данных MCD12Q2:

- временной охват с 2001 по 2012 гг.;
- представлены в виде тайлов по 10° по широте и долготе;
- пространственное разрешение – 500 метров;
- данные представлены в синусоидальной проекции;
- формат данных – контейнер HDF-EOS [10].

Данные MCD12Q2 получены с помощью веб-сервиса национального архива данных спутникового мониторинга Земли USGS Reverb. USGS Reverb бесплатно предоставляет средства поиска и доступа к продуктам и услугам различных систем мониторинга Земли и серверов с данными.

Из данных MCD12Q2 взяты следующие слои: `onset_greenness_increase`, `onset_greenness_maximum`, `onset_greenness_minimum`.

Слой `onset_greenness_increase` содержит информацию о дате начала вегетационного сезона растений. Слой `onset_greenness_maximum` содержит информацию о времени наступления полного созревания растений. Слой `onset_greenness_minimum` содержит даты наступления конца вегетационного сезона.

### **2.3 Классификация растительности TerraNorte RLC2011**

В основу метода классификации положено использование предварительно очищенных от влияния облаков и других мешающих факторов многолетних временных серий данных спутниковых измерений спектрально - отражательных характеристик земного покрова с автоматическим распознаванием его типов на основе алгоритма локально - адаптивной классификации с обучением LAGMA [15]. Созданная на основе разработанного метода новая карта, получившая название TerraNorte RLC, отражает пространственное распределение растительного покрова на территории России и имеет пространственное разрешение 250 м [15]. Карта растительности TerraNotre RLC для территории исследования приведена на рисунке 1.

Легенда карты содержит 22 тематических класса, из которых 18 соответствуют различным типам: 8 лесных типов (темнохвойные вечнозеленые насаждения, светлохвойные вечнозеленые насаждения, лиственные насаждения, смешанные насаждения с преобладанием хвойных пород, смешанные насаждения, смешанные насаждения с преобладанием лиственных пород, хвойные листопадные, редины хвойные листопадные), 3 типа кустарников (луга, степи, хвойные вечнозеленые кустарники), 3 типа тундры (кустарничковая тундра, травянистая тундра, кустарничковая тундра), 2 болотных типа (болота, прибрежная растительность), лесные гари и нерастительные типы (свежие гари, пахотные земли, открытые грунты и выходы горных пород, урбанизированные территории, водные объекты) [16].

В сравнении с ранее созданными на основе спутниковых данных и содержательно близкими информационными продуктами новая карта демонстрирует качественно более высокий уровень картографической достоверности и детальности [15]. На рисунке 1 показано распределение классов по водосборным бассейнам.

## **2.4 Обработка данных NDVI**

Для обработки и анализа данных использовалось программное обеспечение (ПО) ArcGIS Desktop. Первым шагом в обработке стало составление единых композитов из пространственных тайлов (h20v1, h20v2, h21v2, h22v2, h22v3, h23v2, h23v3)  $10^{\circ} \times 10^{\circ}$  со значениями усредненных 16-дневных данных NDVI и слоев с кодами надежности пикселей (Pixel Reliability) с помощью инструмента «мозаика в новый растр». Маска качества пикселя получена из слоев надежности пикселей с помощью инструмента «калькулятор растра» из набора методов алгебра карт в разделе «Spatial Analyst Tools». В калькуляторе растра вводим следующие выражения:

$$\text{NDVI\_mask} = \text{Con}(\text{Raster}(\text{"MOD13Q1 ... PixRel.img"}) == 0, \text{Raster}(\text{"MOD13Q1 ... NDVI.img"}), -3000), \quad (2)$$

где  $\text{Raster}(\text{"MOD13Q1...PixRel.img"}) == 0$  – условие фильтрации исходных пикселей по коду надежности, при котором обработанный слой будет иметь значения NDVI, не подверженные возможным искажениям (таблица 2),

$\text{Raster}(\text{"MOD13Q1...NDVI.img"})$  – входные данные NDVI, подвергаемые фильтрации. В выходной слой будут записаны исходные значения NDVI при удовлетворении вышеописанного условия, а значение -3000 (условно отсутствие данных) присваивается пикселям при всех иных кодах надежности пикселей.

Таблица 2 – Ранжированные значения слоя MOD13Q1 Pixel Reliability

Значение	Название	Описание
-1	Нет данных	Не обработано
0	Надежные данные	Использовать с уверенностью
1	Незначительные данные	Полезные, но обратить внимание на другую информацию о качестве пиксела
2	Снег и лёд	Область покрыта снегом
3	Облачность	Область покрыта облаками



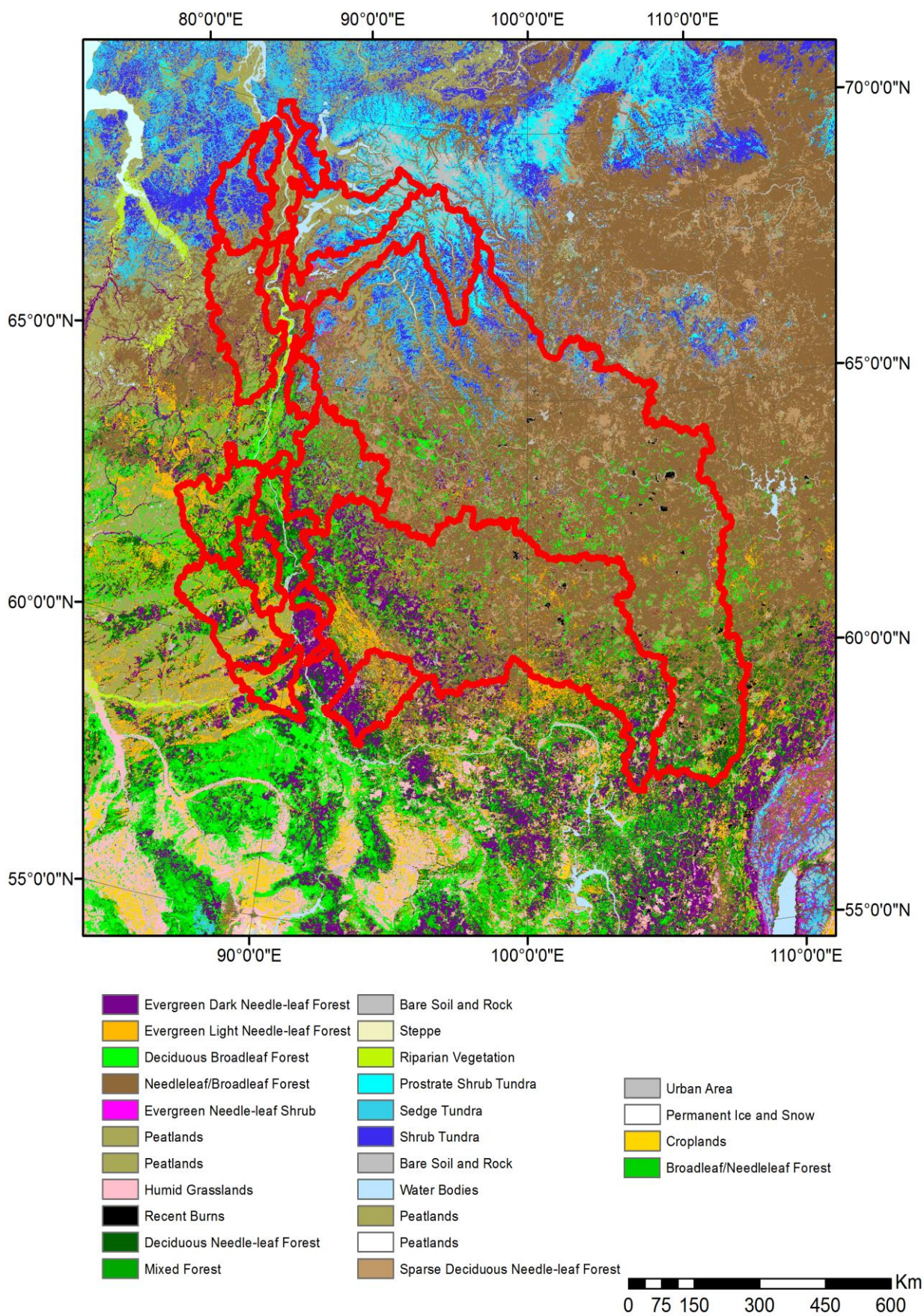


Рисунок 1 - Карта распределение классов растительности водосборных бассейнов по данным TerraNorte RLC



## 2.5 Процесс обработки фенологических данных MCD12Q2

После скачивания исходных данных MCD12Q2, они были обработаны с помощью программного обеспечения ArcGIS Desktop. Обработка пакета данных MCD12Q2 осуществлена для каждого показателя отдельно, для этого на каждом этапе загружался один поднабор данных, к примеру даты начала вегетационного сезона (`onset_greenness_increase`) и операции с разными показателями производились поочередно.

Для полного охвата территории 23-х водосборных бассейнов было использовано 7 тайлов (`h20v1`, `h20v2`, `h21v2`, `h22v2`, `h22v3`, `h23v2`, `h23v3`). С помощью ArcGIS инструмента «мозаика в новый растр» отдельные тайлы были объединены в новый растр, после чего применена фильтрация пикселей нового растра по маске водных поверхностей (`MOD44W`), при этом извлекаются те значения MCD12Q2, которые соответствуют значению 0 (т.е. территории суши) в слое `MOD44W`. Для автоматизации процесса обработки данных проделываем те же операции для 2001 – 2013 годов с поднаборами данных `onset_greenness_maximum` и `onset_greenness_minimum` в режиме пакетной обработки.

В данных MCD12Q2 фенологические даты начинают исчисление с 1 января 2000 года, и значения не обнуляются в слоях данных последующих лет, т.е. 2001 год начинается с 367 дня, 2002 с 732 и т.д. Такой формат дат не позволяет провести равноценное сравнение ежегодных значений. Корректировка всех значений фенологических дат каждого года с 2001 по 2013 гг. осуществлена переводом в количество дней с начала каждого года, условно называемым юлианским днем.

На следующем шаге была выполнена трансформация исходной синусоидальной проекции в проекцию Альберса (`Albers_Conical_Equal_Area` с центральным меридианом -  $100^{\circ}$ , линией нулевых искажений 1 –  $50^{\circ}$ , линией нулевых искажений 2 –  $70^{\circ}$ , широтой начала координат –  $56^{\circ}$ ). Длительность вегетационного сезона рассчитываем с помощью вычитания растрового слоя

дат начало вегетационного сезона из дат конца вегетационного сезона одного года. К примеру, на рисунке 2 представлены рассчитанные карты дат начала, пика, конца и длительности вегетационного сезона за 2001 год. Таких карт получается 4 шт. на один год, временной охват – 13 лет, и в общей сумме получается 52 карты.

### **3 Характеристика водосборных бассейнов**

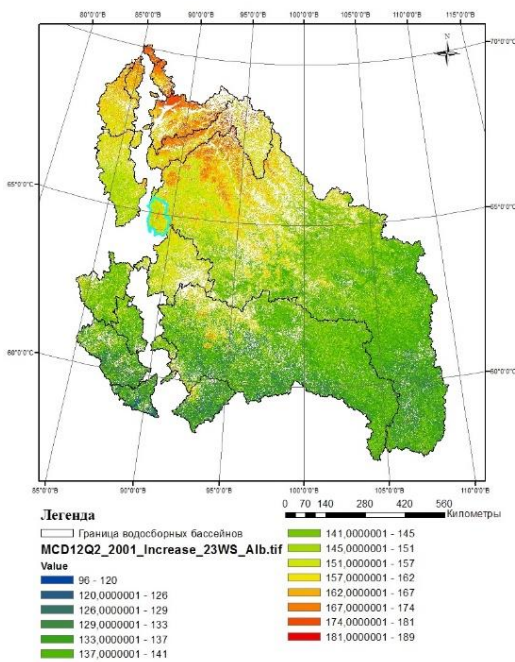
#### **3.1 Вычисление статистики для NDVI**

Из полученных отфильтрованных значений индекса NDVI были вычислены максимальное значение пикселя на каждый год с помощью инструмента ArcGIS «статистика по ячейкам», позволяющего вычислить статистику по нескольким растровым слоям. Далее этим же инструментом вычислено среднее значение и среднеквадратичное отклонение от получившихся растров с максимальным значением пикселя.

На рисунке 3 представлена карта распределения усредненных значений индекса NDVI за период 2001 - 2013 годов для исследуемой территории. На рисунке 4 представлена карта среднеквадратичного отклонения индекса NDVI по данным MODIS за период 2001 - 2013 годов.

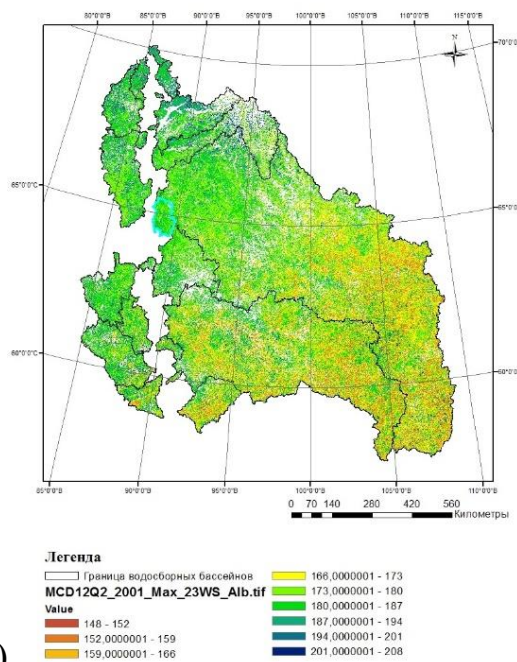
Из рисунка 3 мы видим, что значения индекса NDVI более высоки в южных водосборных бассейнах. На северных территориях биомасса растений имеет меньшее количество, поэтому индекс NDVI там меньше. На рисунке 4 отклонение индекса NDVI от среднего значения низкие (0,0264), но есть участки, где значения выше (0,09) за период с 2001 по 2013 год.

Карта дат начала вегетационного сезона в 2001 по данным MCD12Q2 (500 метров)



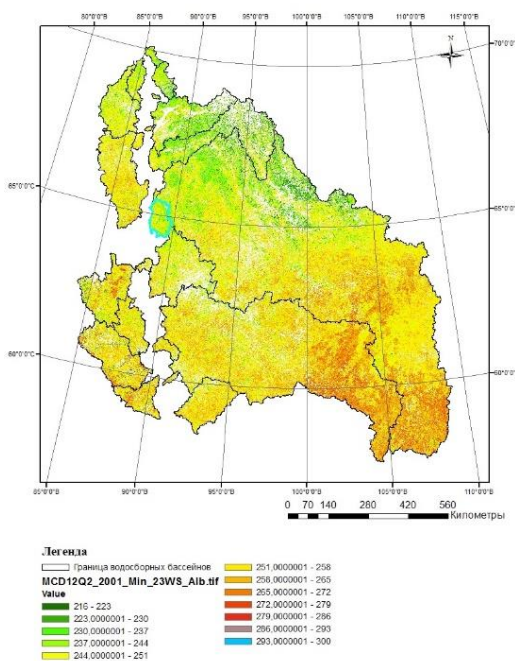
а)

Карта дат пика вегетационного сезона в 2001 по данным MCD12Q2 (500 метров)



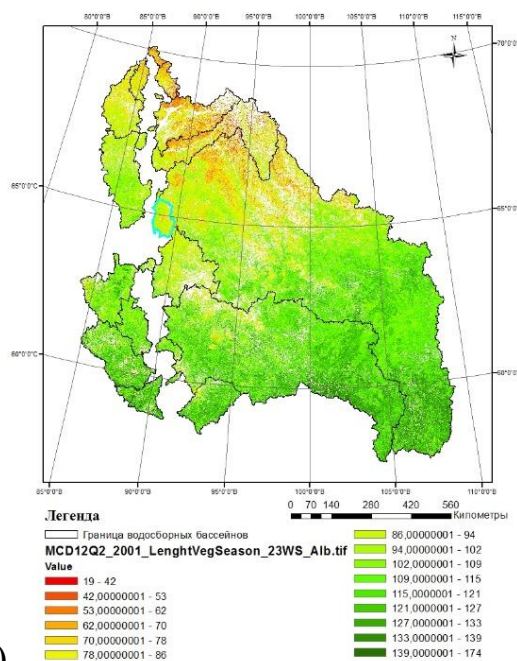
б)

Карта дат конца вегетационного сезона в 2001 по данным MCD12Q2 (500 метров)



в)

Карта длительности вегетационного сезона в 2001 по данным MCD12Q2 (500 метров)



г)

Рисунок 2 – Набор карт фенологических дат для вегетационного сезона 2001 года: а) даты начала, б) даты пика, в) даты конца и г) длительность вегетационного сезона (дней)

На рисунке 2 видно, что до 65° с.ш. даты начала, пика вегетационного сезона наступает раньше и длительность вегетационного сезона (дней) больше, чем на территории севернее 65° с.ш.

# Карта распределения индекса NDVI по данным MOD12Q1 с 2001 по 2013 год

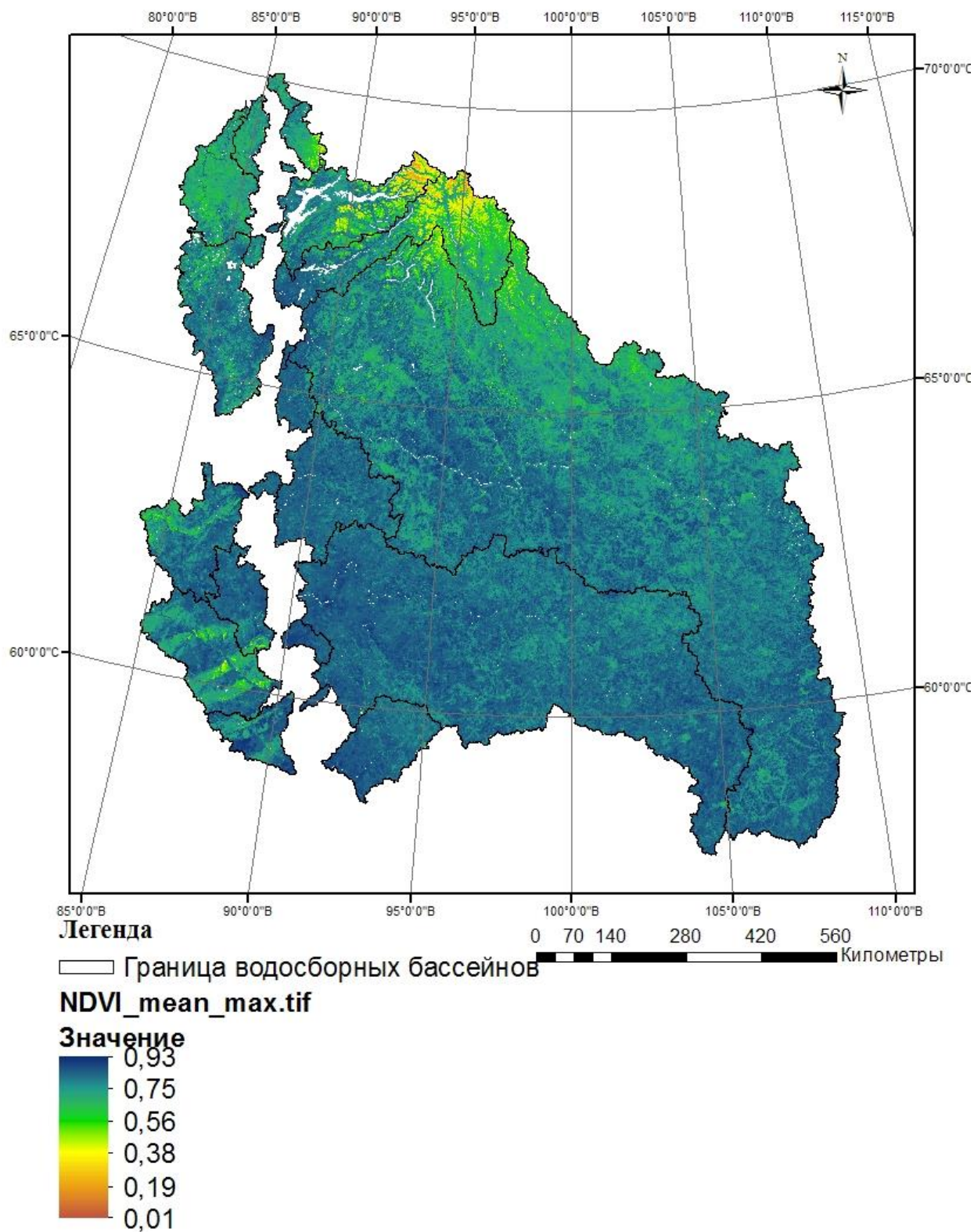


Рисунок 3 – Карта распределения усредненных значений индекса NDVI по данным MODIS с 2001 по 2013 год



## Карта среднеквадратичного отклонения индекса NDVI по данным MOD12Q1 с 2001 по 2013 год

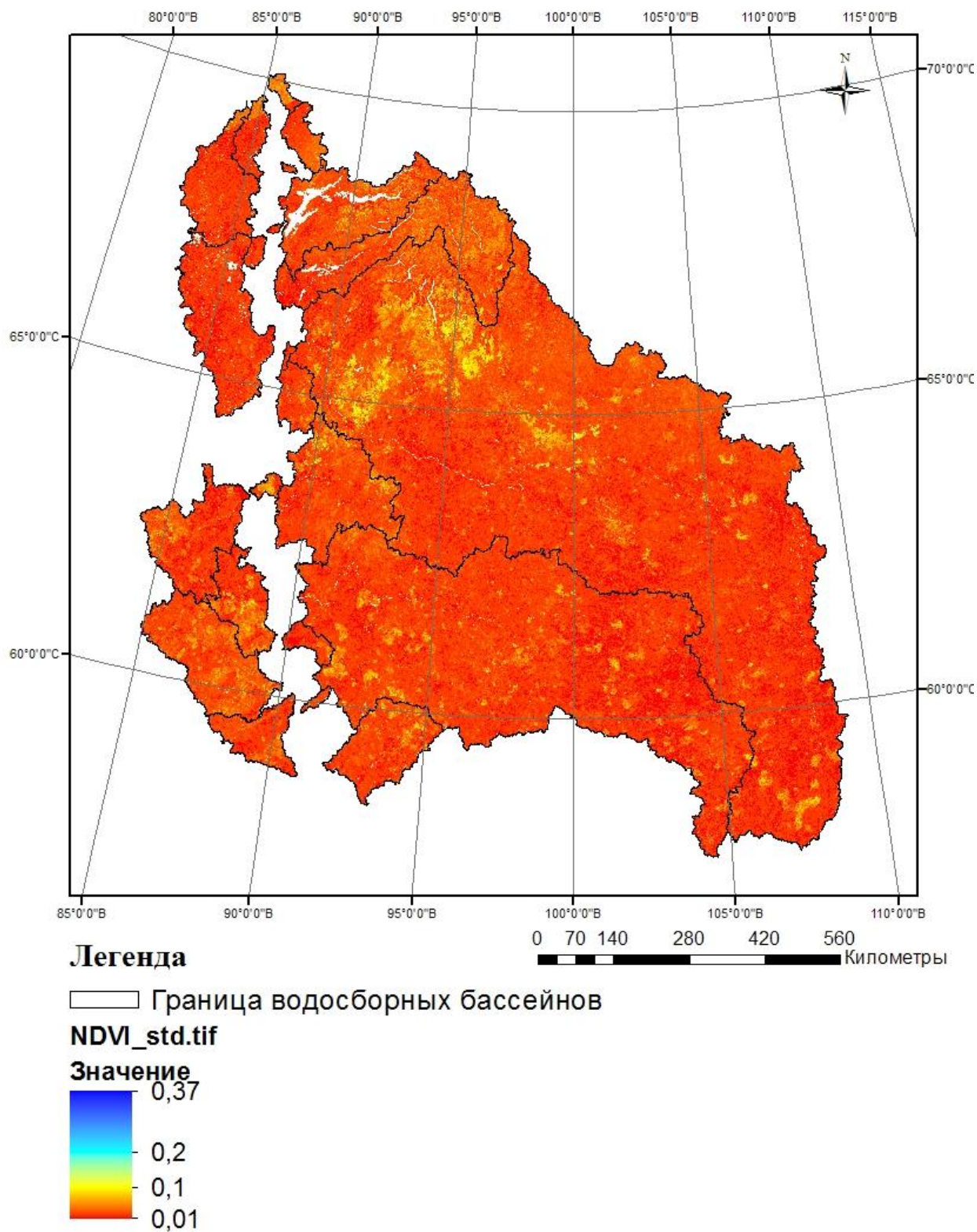


Рисунок 4 – Карта среднеквадратичного отклонения индекса NDVI по данным MODIS с 2001 по 2013 год

### 3.2 Вычисление статистики для фенологических дат

С помощью инструмента ArcGIS «статистика по ячейкам» было вычислено среднее значение рассматриваемых дат и их стандартное отклонение за весь период. Статистика проводилась по обработанным данным дат начала, пика, конца и длительности вегетационного сезона за период 2001-2013 годы. Из 13 растровых данных дат начала вегетационного сезона получаются две карты: карта с среднеквадратичным отклонением и карта среднего значения даты начала вегетационного сезона. И также подсчитывается статистика для других фенофаз. Среднеквадратичное отклонение показывает рассеивание значений из года в год от среднего. Полученные результаты представлены на рисунках 5 – 12.

На рисунках 5, 7, 9, 11 прослеживается территориальная зависимость по водосборным бассейнам. Среднее значение на карте среднеквадратичного отклонения дат начала (рисунок 6) по 23 водосборным бассейнам равно 7, но есть участки в водосборном бассейне реки Сым с значением равном 20 дней. Такое же среднеквадратичное отклонение наблюдается на рисунке 8. Восточнее 100° в.д. на карте среднеквадратичного отклонения дат конца (рисунок 10) растительность имеет низкие значения отклонения, а западнее от этой долготы значения варьируются от 8 до 21 дней.

## Карта среднего значения даты начала вегетационного сезона с 2001 по 2013 год

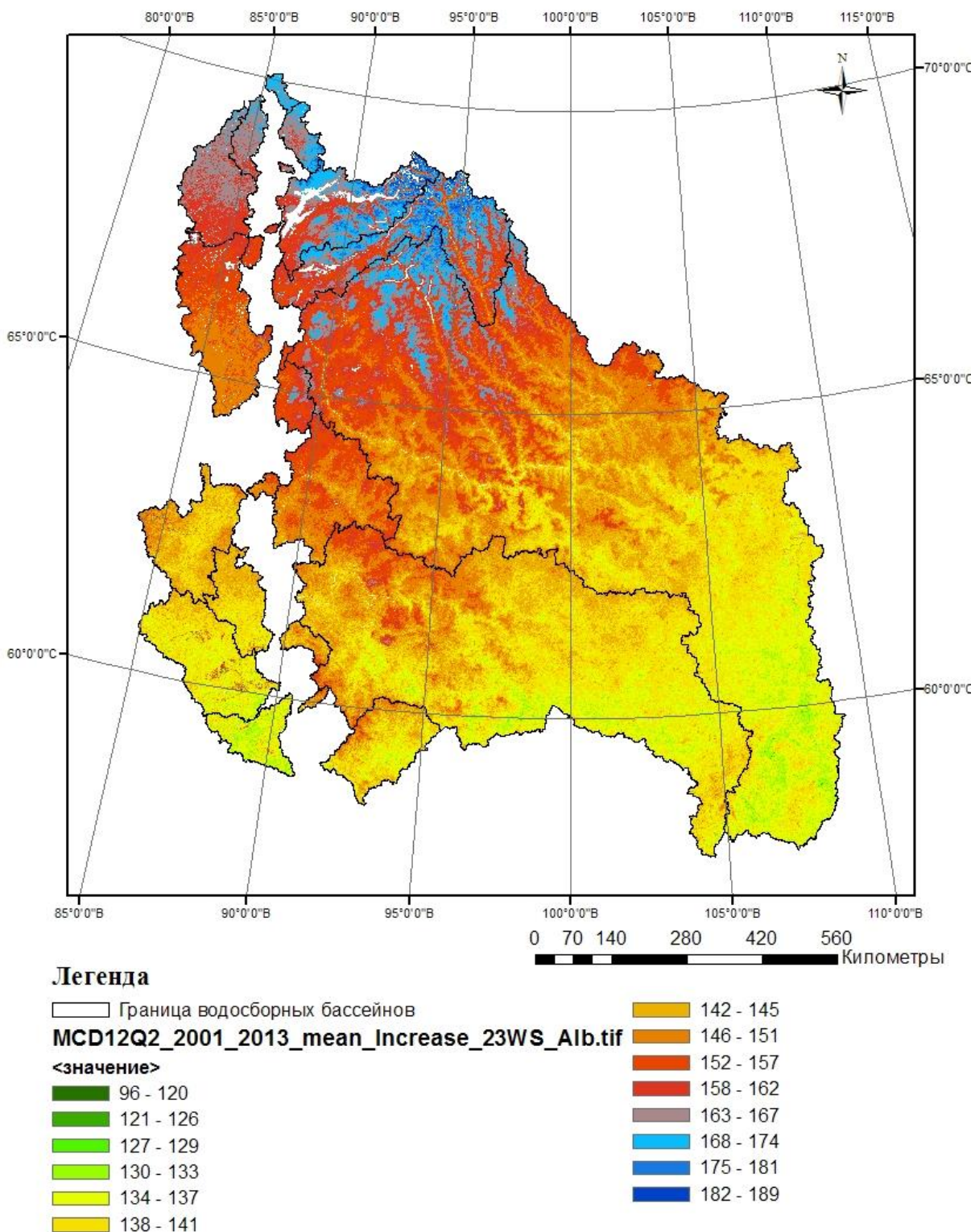
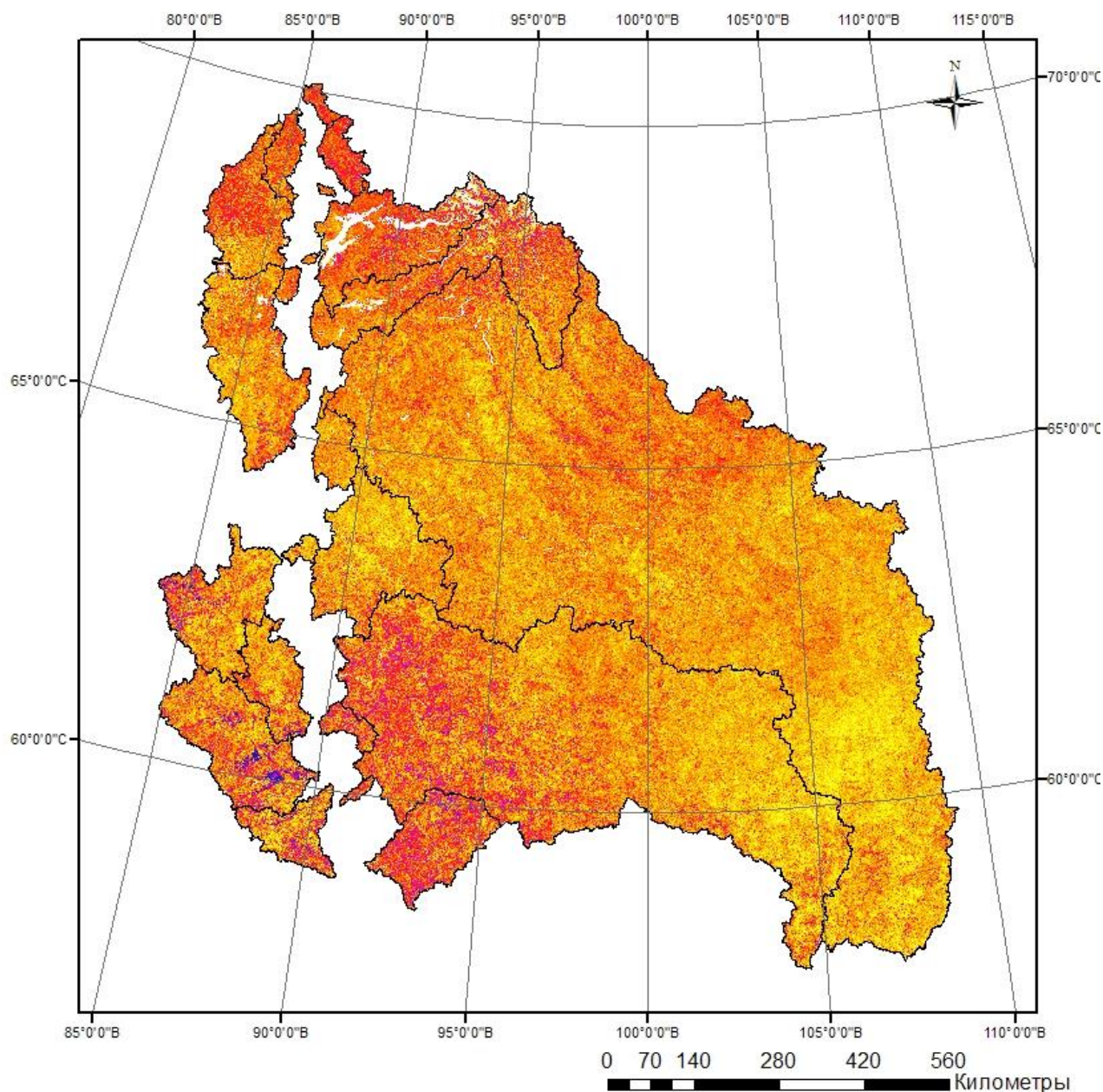


Рисунок 5 – Карта среднего значения даты начала вегетационного сезона с 2001 по 2013 год



## Карта среднеквадратичного отклонения даты начала вегетационного сезона с 2001 по 2013 год



### Легенда

Граница водосборных бассейнов

MCD12Q2\_2001\_2013\_std\_Increase\_23WS\_Alb.tif

Значение

Высокий : 20

Низкий : 0

Рисунок 6 – Карта среднеквадратичного отклонения даты начала вегетационного сезона с 2001 по 2013 год



## Карта среднего значения даты пика вегетационного сезона с 2001 по 2013 год

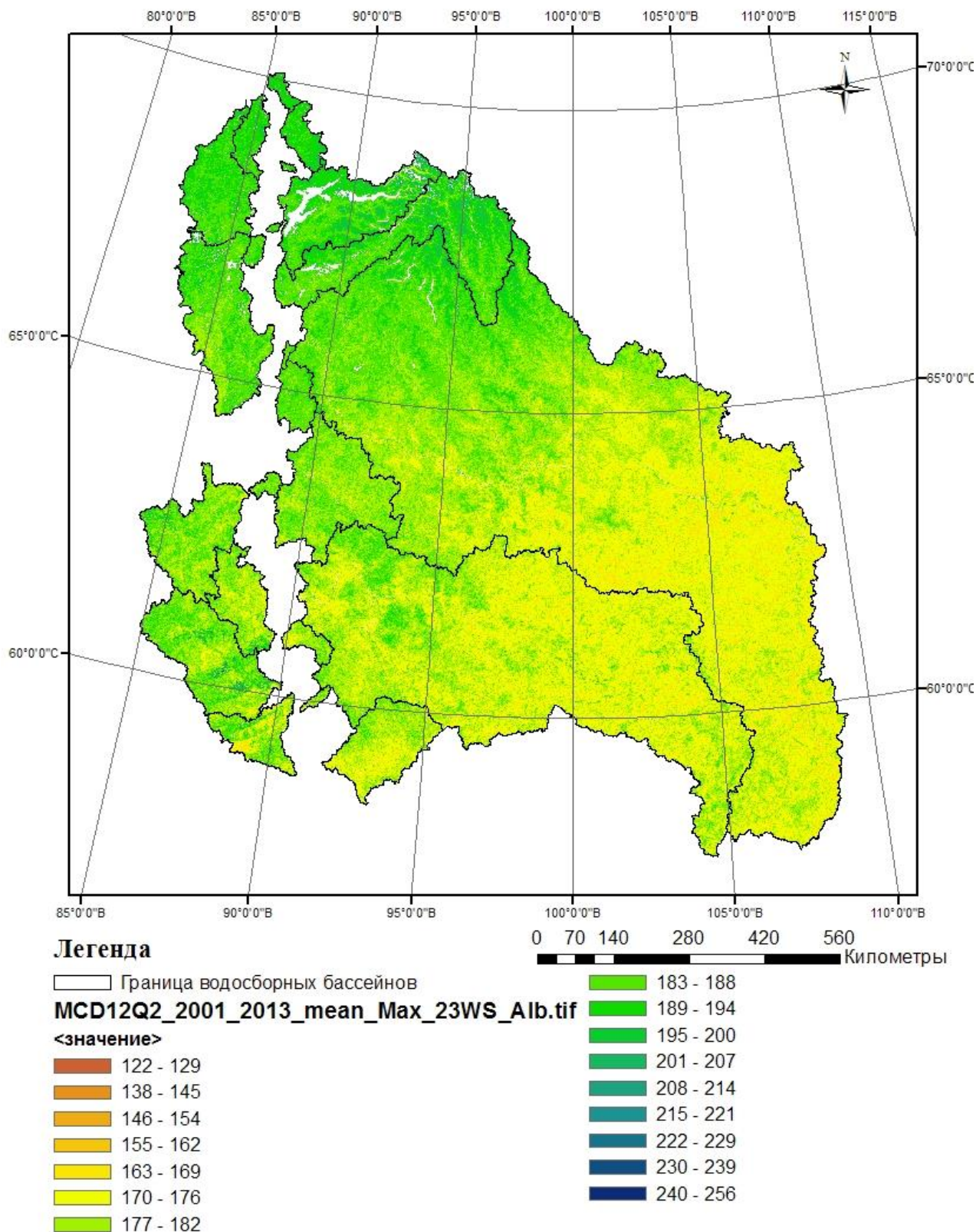
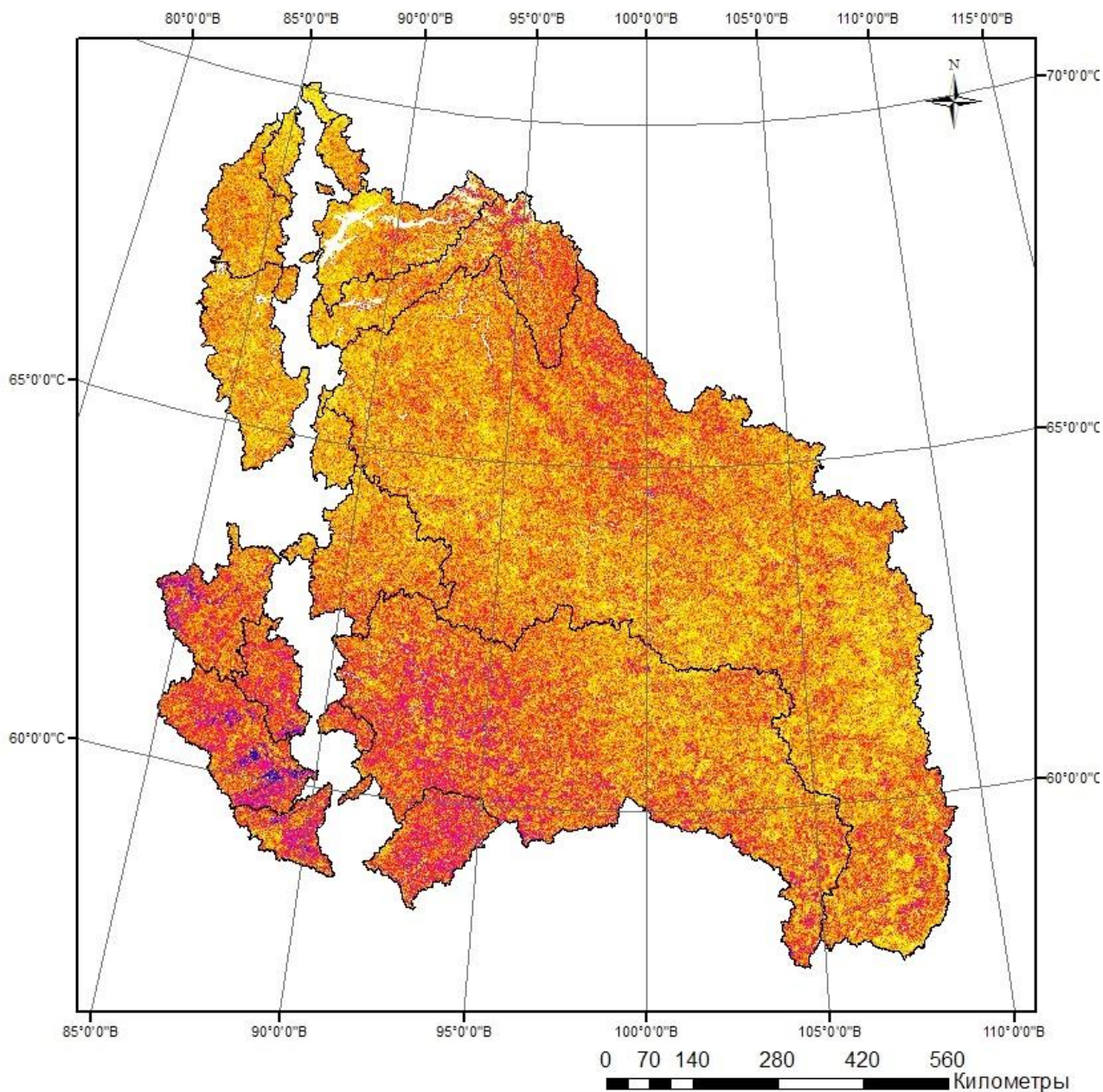


Рисунок 7 – Карта среднего значения даты пика вегетационного сезона с 2001 по 2013 год

## Карта среднеквадратичного отклонения даты пика вегетационного сезона с 2001 по 2013 год



### Легенда

Граница водосборных бассейнов

MCD12Q2\_2001\_2013\_std\_Max\_23WS\_Alb.tif

Значение

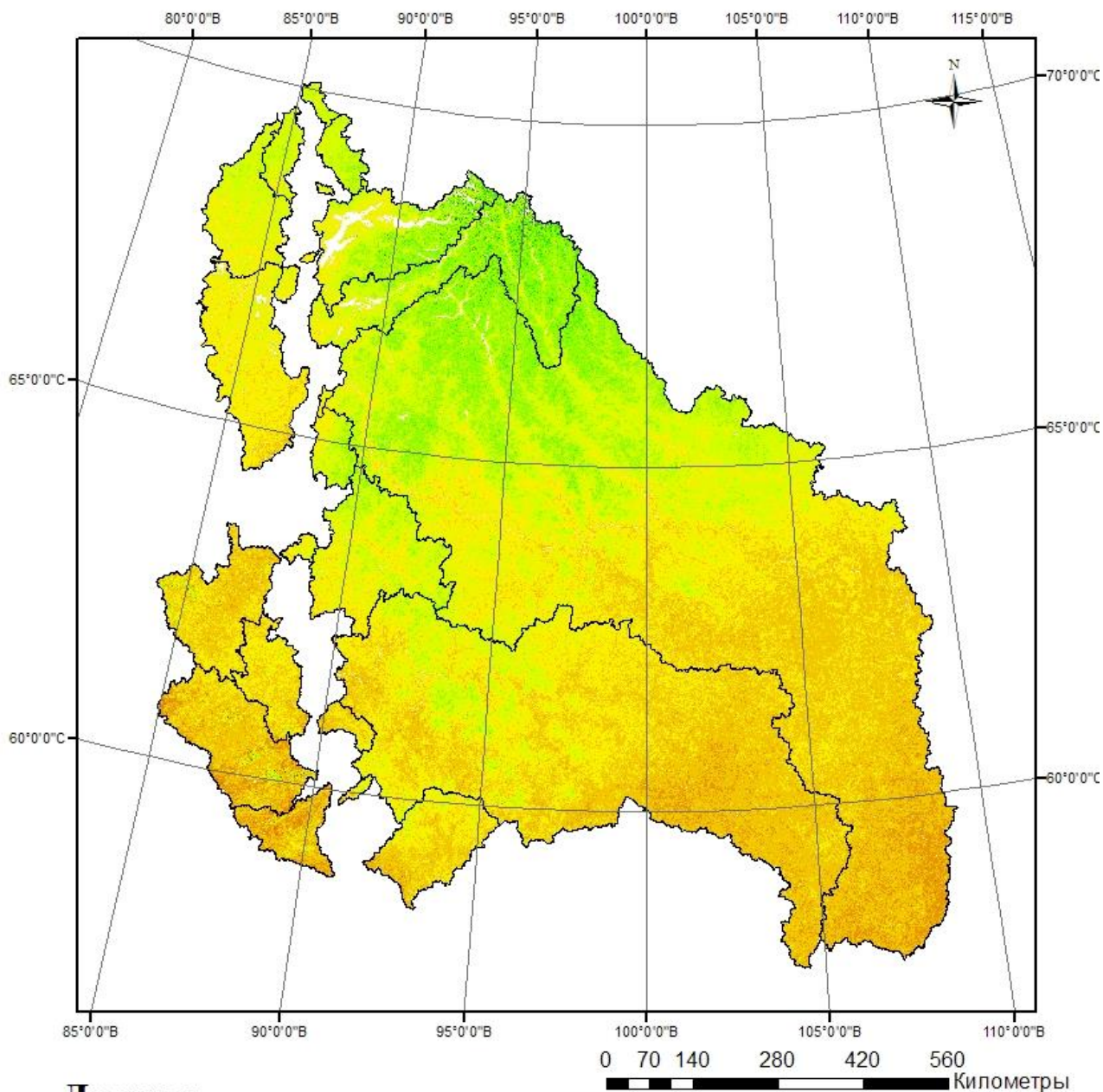
Высокий : 22

Низкий : 0

Рисунок 8 – Карта среднеквадратичного отклонения даты пика вегетационного сезона с 2001 по 2013 год



## Карта среднего значения даты конца вегетационного сезона с 2001 по 2013 год



### Легенда

Граница водосборных бассейнов

**MCD12Q2\_2001\_2013\_Mean\_Min\_23WS\_Alb.tif**

<значение>

209 - 216

217 - 223

224 - 230

231 - 237

238 - 244

245 - 251

252 - 258

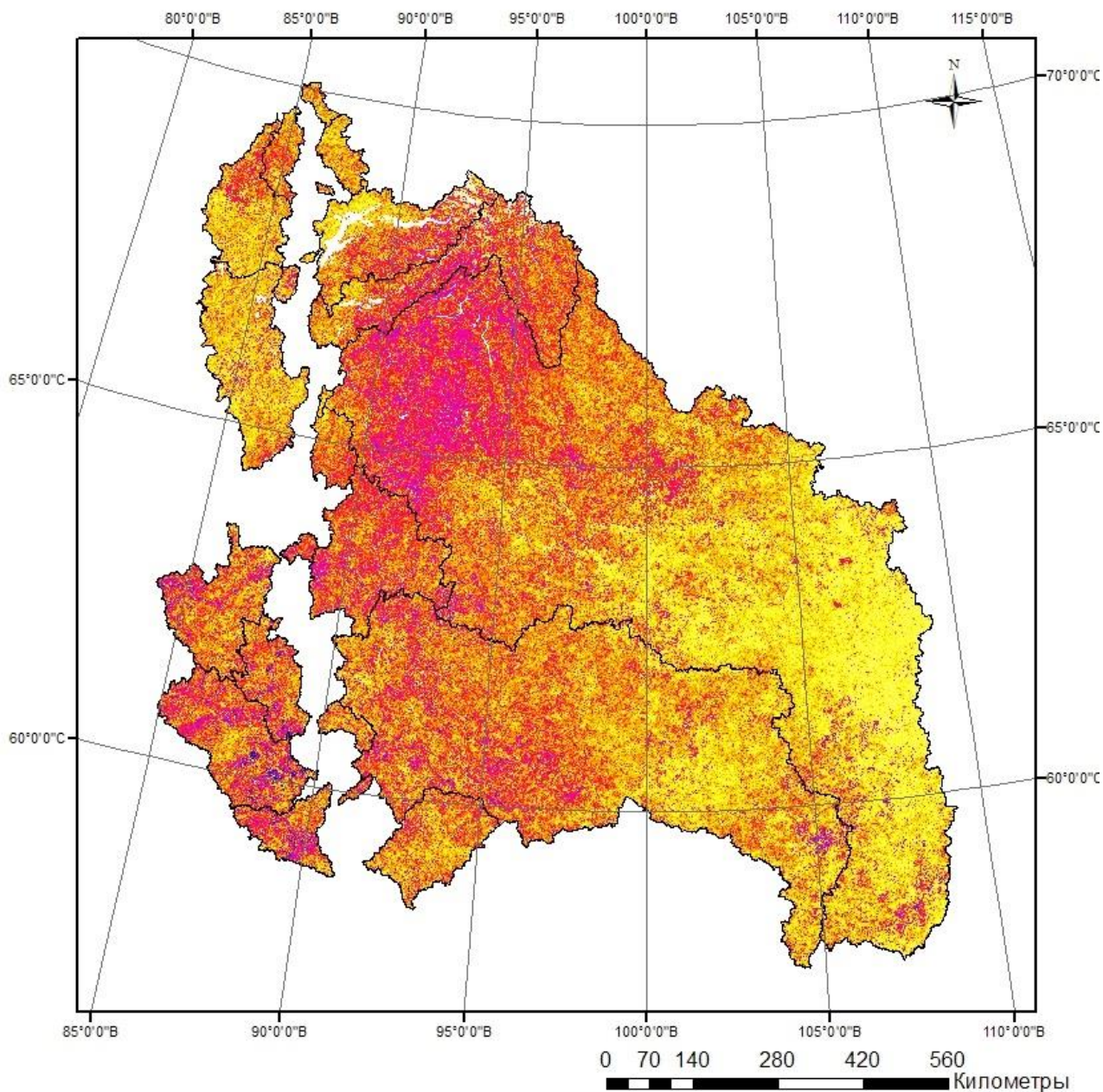
259 - 265

266 - 272

273 - 279

Рисунок 9 – Карта среднего значения даты конца вегетационного сезона с 2001 по 2013 год

## Карта среднеквадратичного отклонения даты конца вегетационного сезона с 2001 по 2013 год



### Легенда

Граница водосборных бассейнов

MCD12Q2\_2001\_2013\_std\_Min\_23WS\_Alb.tif

#### Значение

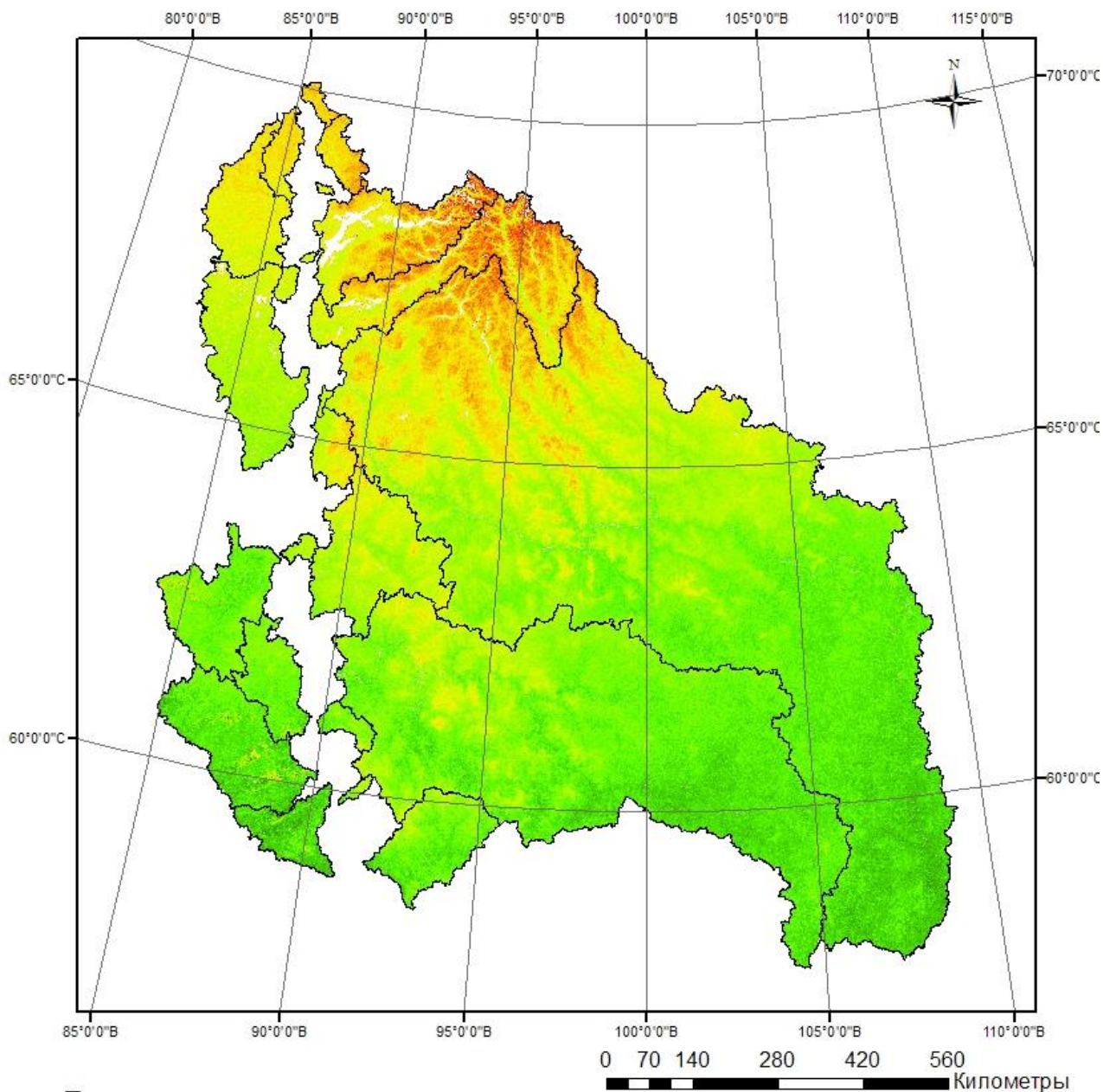
Высокий : 25

Низкий : 0

Рисунок 10 – Карта среднеквадратичного отклонения даты конца вегетационного сезона с 2001 по 2013 год



## Карта среднего значения длительности вегетационного сезона с 2001 по 2013 год



### Легенда

Граница водосборных бассейнов

MCD12Q2\_2001\_2013\_mean\_LenghtVegSeason\_8T\_Alb.tif

<значение>

19 - 42

43 - 53

54 - 62

63 - 70

71 - 78

79 - 86

87 - 94

95 - 102

103 - 109

110 - 115

116 - 121

122 - 127

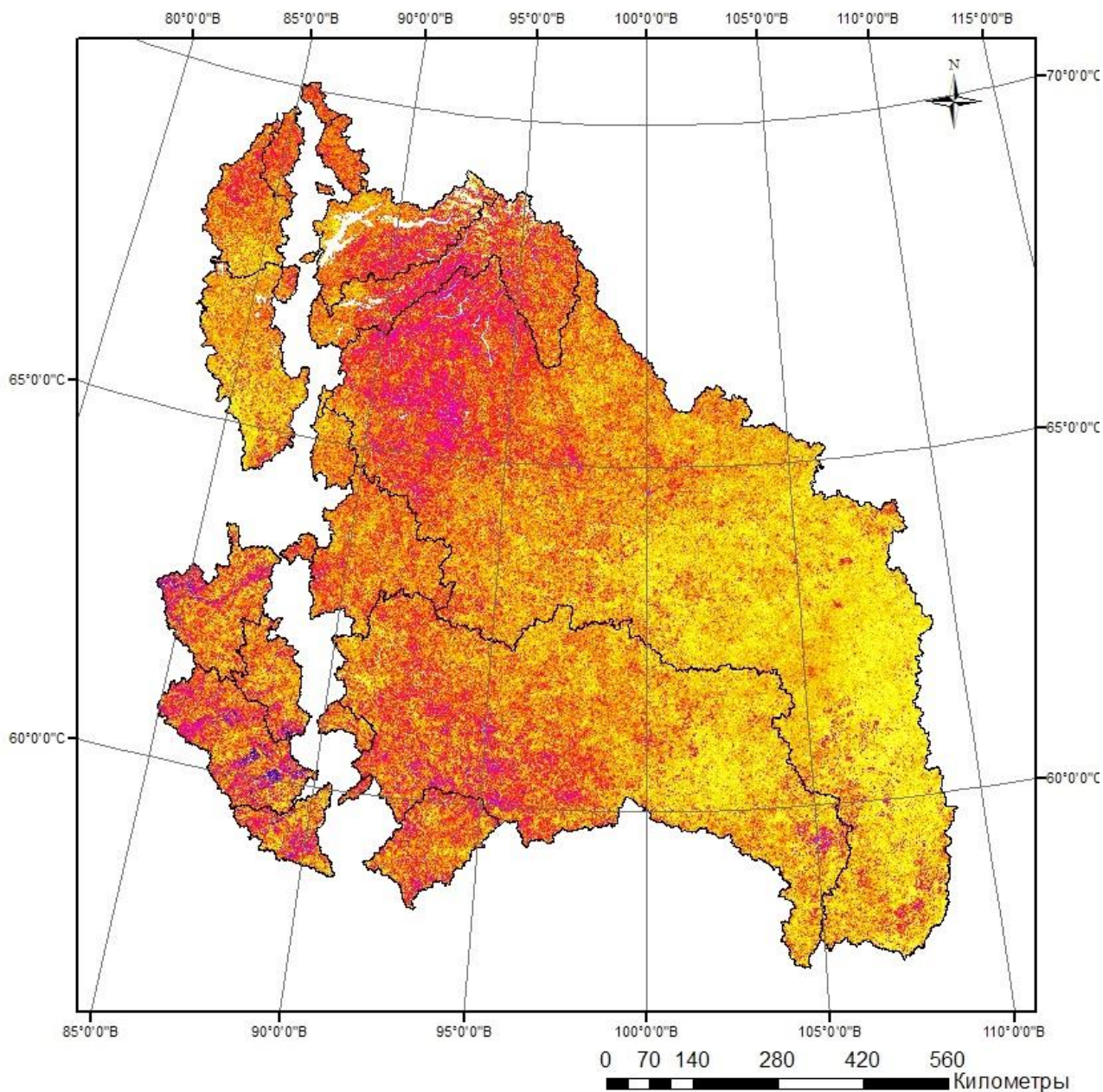
128 - 133

134 - 139

140 - 174

Рисунок 11 – Карта среднего значения длительности вегетационного сезона с 2001 по 2013 год

## Карта среднеквадратичного отклонения длительности вегетационного сезона с 2001 по 2013 год



### Легенда

Граница водосборных бассейнов

MCD12Q2\_2001\_2013\_std\_LenghtVegSeason\_8T\_Alb.tif

Значение

Высокий : 32



Низкий : 0

Рисунок 12 – Карта среднеквадратичного отклонения длительности  
вегетационного сезона с 2001 по 2013 год

### 3.3 Расчет карт трендов

Для расчета карт трендов был написан код программы в C#. Алгоритм работы этой программы для расчета карт трендов состоит из следующих этапов:

Шаг 1 - создается новый файл результирующего растра с размером входных данных;

Шаг 2 - для каждого пиксела результирующего растра формируется два массива  $X$  – список годов и  $Y$  – список значений пикселей в соответствующий год;

Шаг 3 - для полученных массивов выполняется функция `trend_k`, которая описана ниже;

Шаг 4 - результат функции записывается как значение  $(i, j)$ -того пиксела.

Реализация функции расчета коэффициента на языке C# выглядит так:

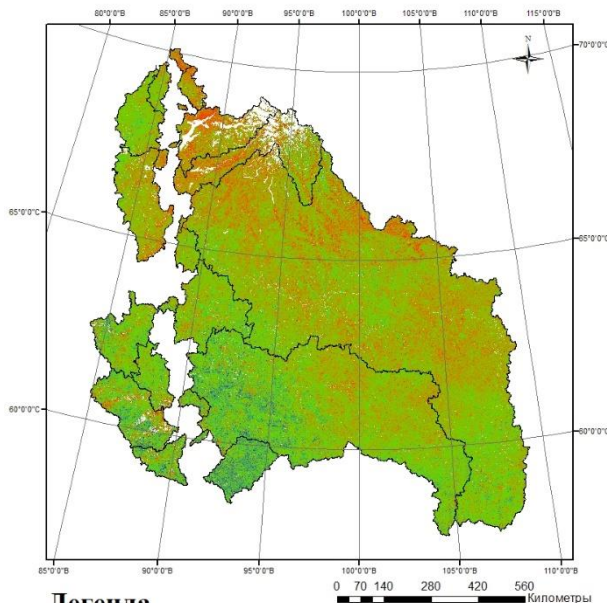
```
static double trend_k(float[] x, float[] y, int n)
{
    double sumx = 0;
    double sumy = 0;
    double sumx2 = 0;
    double sumxy = 0;
    double a;
    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        sumx += x[i];
        sumy += y[i];
        sumx2 += x[i] * x[i];
        sumxy += x[i] * y[i];
    }
    a = (n * sumxy - (sumx * sumy)) / (n * sumx2 - sumx * sumx);
    return a;
}
```

Входные данные – массив значений по оси  $X$  (годы 2001, 2002, 2003 ... 2013),  $Y$  – значение пиксела в соответствующий год.

Для выходной карты записывается коэффициент угла наклона прямой, то есть коэффициент  $a$ . Полученные результаты представлены на рисунке 13.



Карта тренда начала вегетационного сезона за 2001 по 2013 год по данным MCD12Q2



**Легенда**

Граница водосборных бассейнов

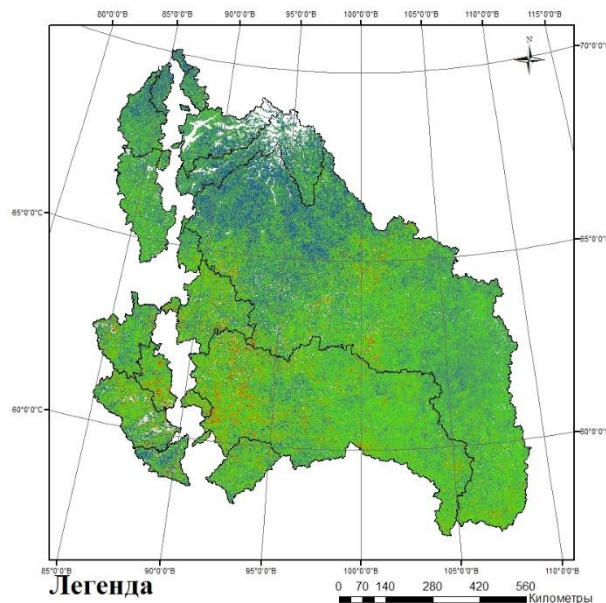
trends\_mcd12q2\_Increase.tif

**Значение**

Высокий : 2  
Низкий : -2

а)

Карта тренда конца вегетационного сезона за 2001 по 2013 год по данным MCD12Q2



**Легенда**

Граница водосборных бассейнов

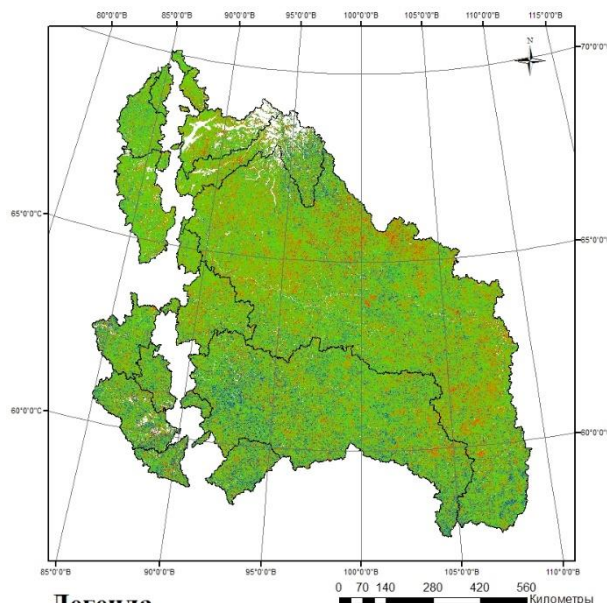
trends\_mcd12q2\_Minimum.tif

**Значение**

Высокий : 2  
Низкий : -3

б)

Карта тренда максимума вегетационного сезона за 2001 по 2013 год по данным MCD12Q2



**Легенда**

Граница водосборных бассейнов

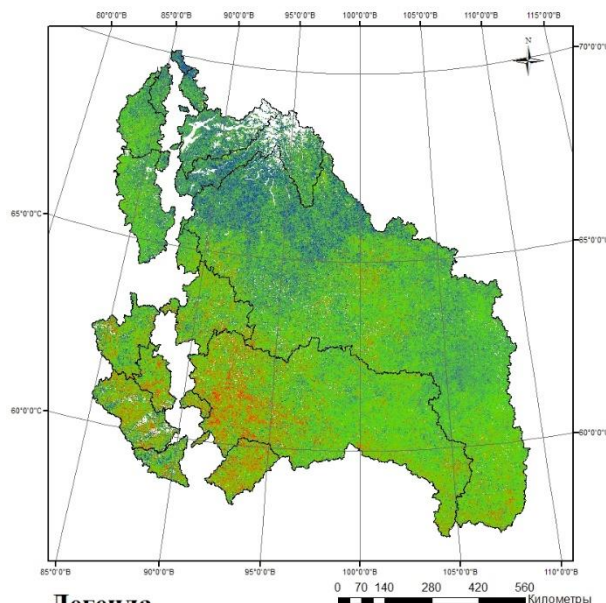
trends\_mcd12q2\_Maximum.tif

**Значение**

Высокий : 2  
Низкий : -2

в)

Карта тренда длительности вегетационного сезона за 2001 по 2013 год по данным MCD12Q2



**Легенда**

Граница водосборных бассейнов

trends\_mcd12q2\_LenghtVegSeason.tif

**Значение**

Высокий : 3  
Низкий : -3

г)

Рисунок 13 – Карты трендов дат: а) начала, б) максимума, в) конца и г) длительности вегетационного сезона за период 2001 - 2013 годы



На рисунке 13 мы видим, что с 2001 по 2013 год начало вегетационного сезона по нескольким северным бассейнам сдвигается на 2 дня раньше (рисунке 13 а), а конец вегетационного сезона имеет положительную тенденцию в 2 дня (рисунке 13 в), в результате чего оба фактора оказали влияние на увеличению длительности вегетационного сезона (рисунке 13 г).

#### **4 Статистика NDVI и фенофаз по классам растительности**

С помощью инструмента ArcGIS «извлечь по атрибутам», который извлекает ячейки раstra, основываясь на логическом запросе, мы извлекаем пиксели, принадлежащие одному классу из карты растительности TerraNorte RLC2011. Полученный набор слоев – классов растительности используем как маску для получения средних значений NDVI за 2001 - 2013 годы.

Таблицу распределения по классам растительности TerraNorte RLC2011 из полученных средних значений NDVI за период 2001 – 2013 годы была составлена в программе Microsoft Office Excel и построен график распределения по значениям из таблиц (рисунок 14). По рисунку 14 видно какие значения индекса NDVI принадлежат тому или иному типу растительного покрова.

С помощью полученного набора слоев – классов растительности TerraNorte RLC2011 были извлечены средние значения дат начала, пика, конца и длительности вегетационного сезона MCD12Q2 за период 2001 по 2013 год по классам растительности TerraNorte RLC2011.

Из полученные средних значения фенофаз для каждого класса составляем таблицу распределения в программе Microsoft Office Excel. Далее строим график распределения по значениям из таблицы, результаты на рисунке 15 - 18.

На рисунке 15 есть некое деление на 2 группы: классы растительности, которые растут на юге исследуемой территории, а другие на севере (травянистая тундра, кустарниковая тундра, кустарниковая тундра с

доминированием кустарников высотой более 40 см. и т.д.). Такое деление на группы прослеживается и на других графиках (рисунок 16, 17, 18).

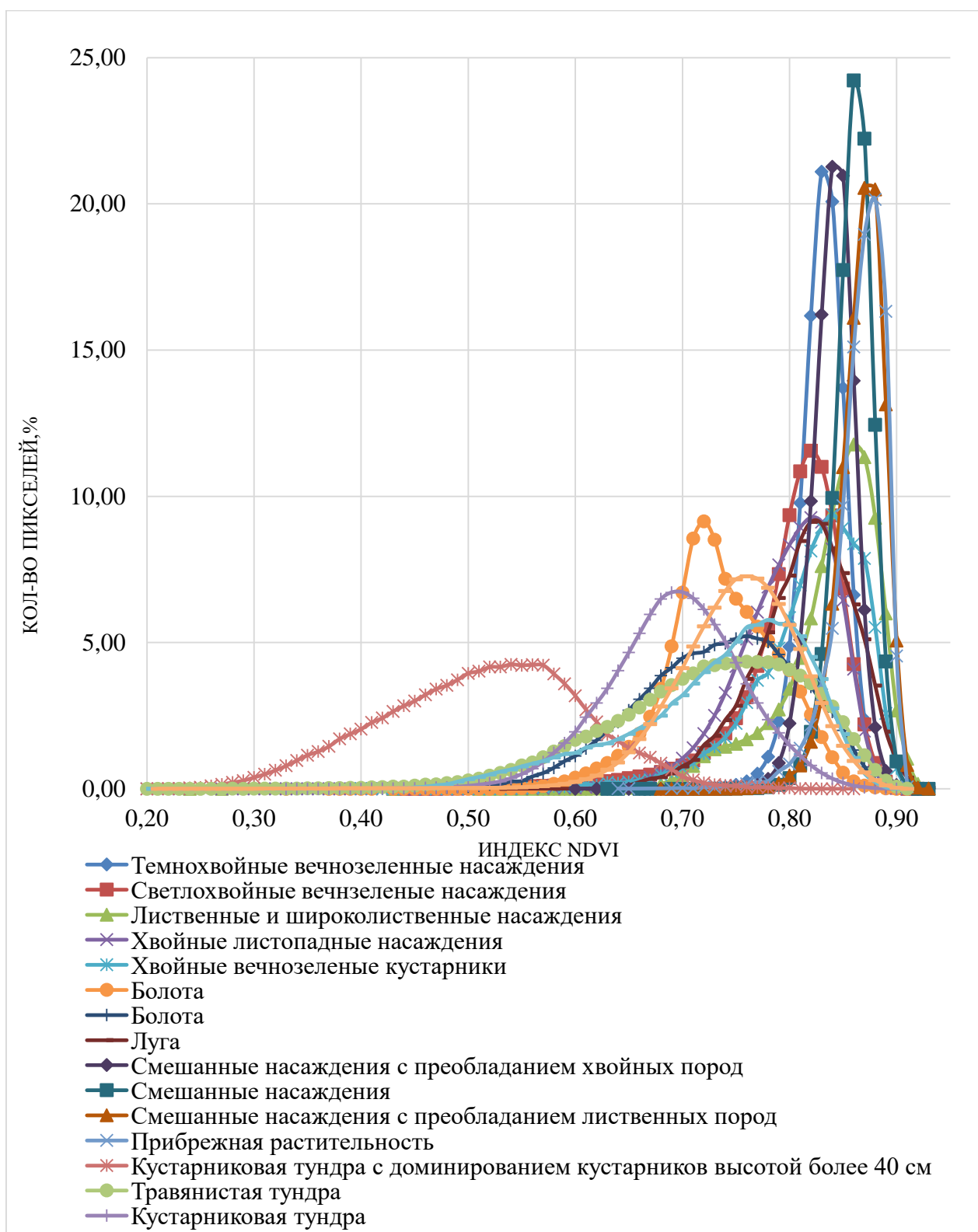


Рисунок 14 - График распределения NDVI по типам растительного покрова на основе данных TerraNorthe RLC2011

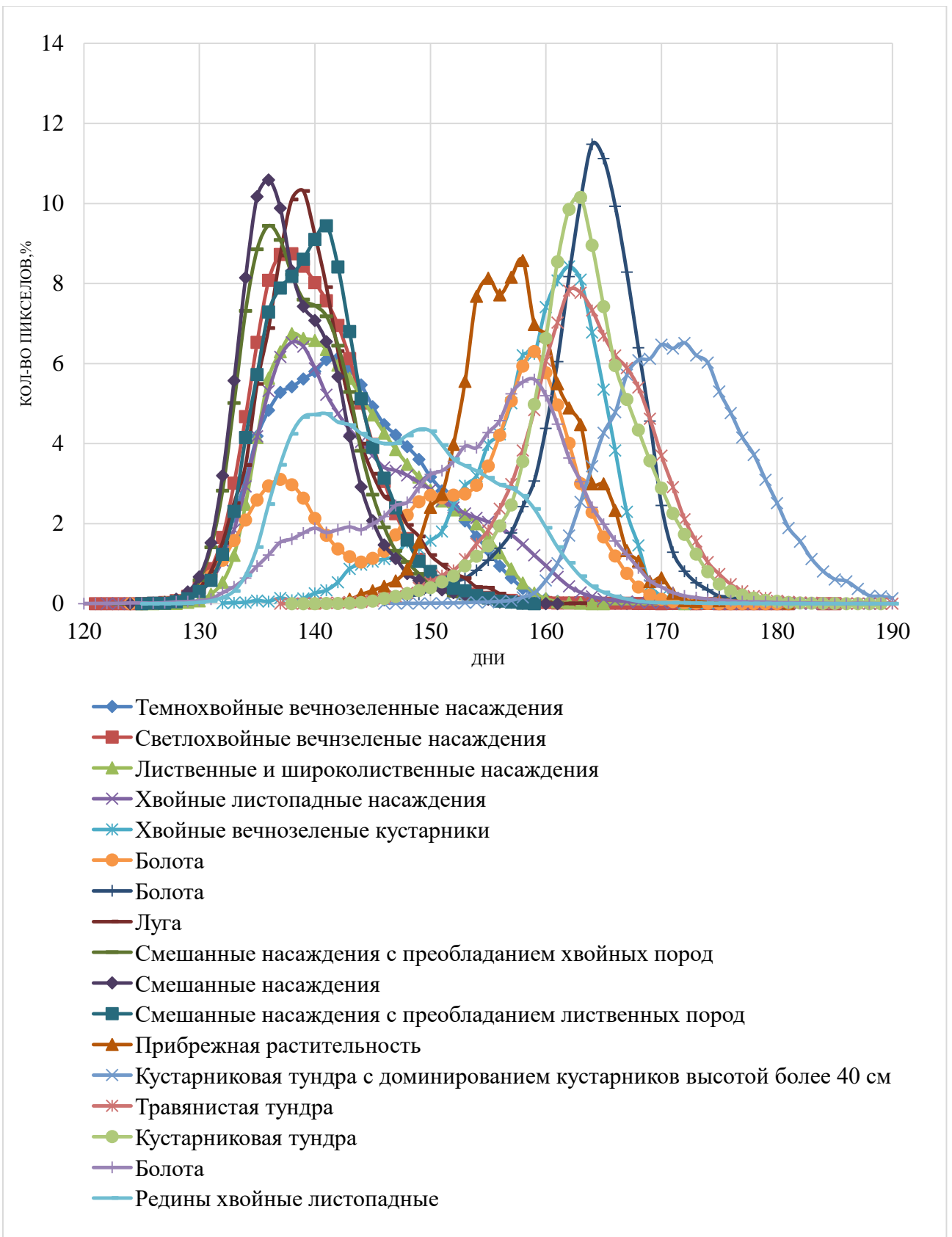


Рисунок 15 - График распределения среднего значения дат начала вегетационного сезона за период 2001 - 2013 годы по классам растительности

TerraNorte RLC2011

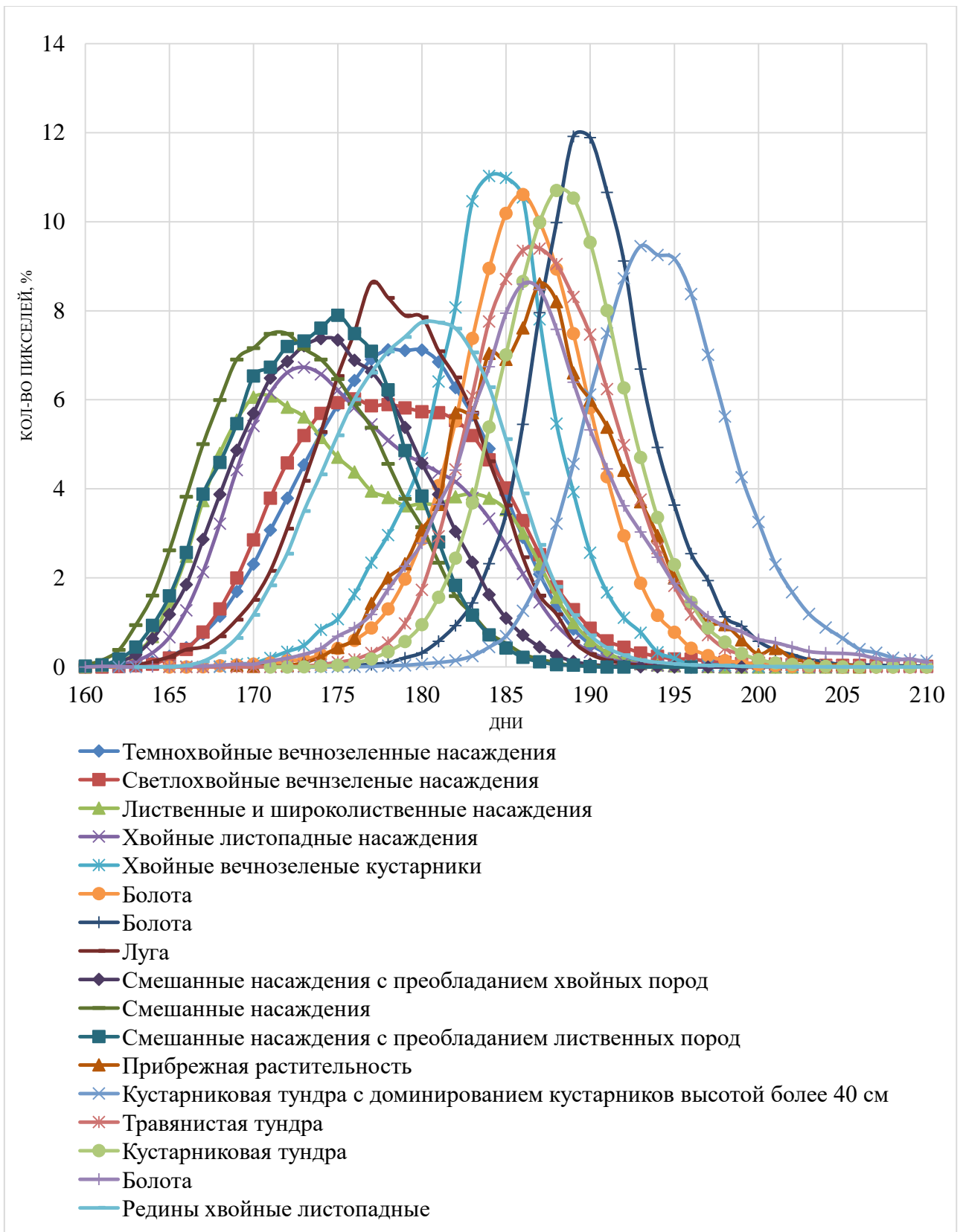


Рисунок 16 - График распределения среднего значения дат пика вегетационного сезона за период 2001 - 2013 годы по классам растительности TerraNorte

RLC2011

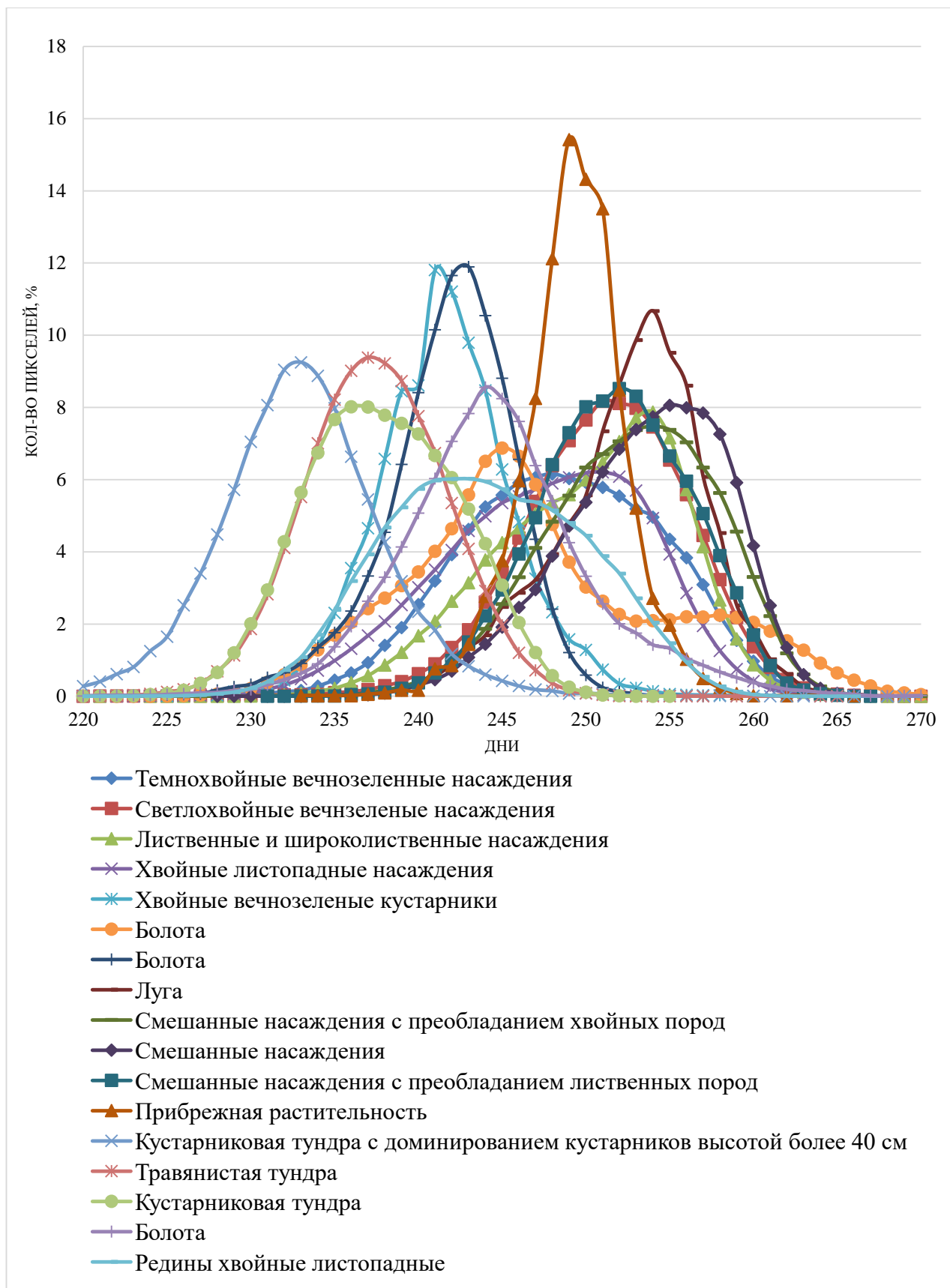


Рисунок 17 - График распределения среднего значения дат конца вегетационного сезона за период 2001 - 2013 год по классам растительности

TerraNorte RLC2011

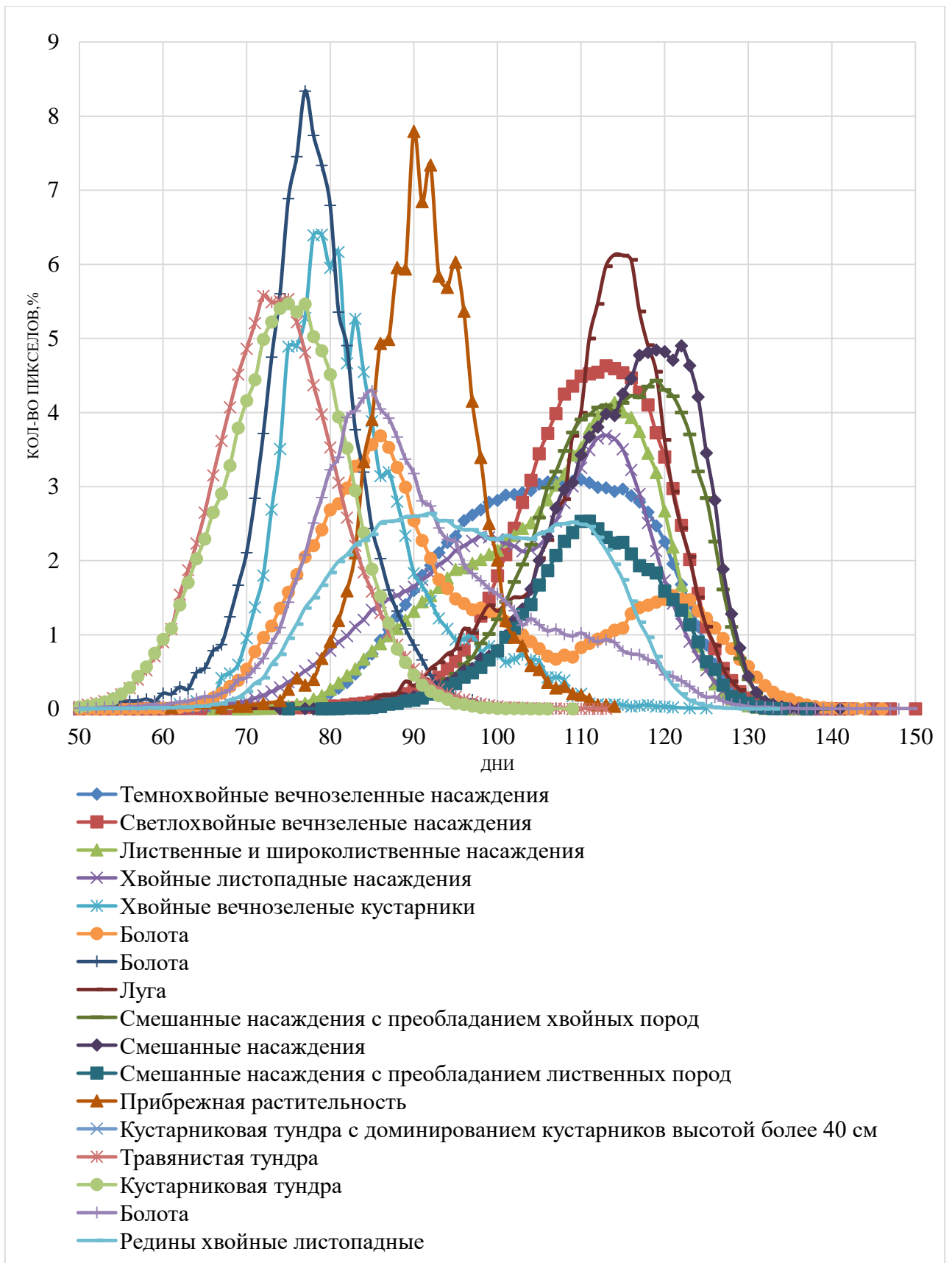


Рисунок 18 - График распределения среднего значения длительности вегетационного сезона за период 2001 - 2013 год по классам растительности

TerraNorte RLC2011

На следующем этапе работы с помощью зональной статистики в ArcGIS были определены средние значения и среднеквадратичное отклонение по 23 водосборным бассейнам. Инструментом «зональная статистика в таблицу» были подсчитаны средние значения растра в пределах 23 водосборных бассейнов и результаты записаны в таблицу 3.

Таблица 3 - Средние значения трендов фенофаз по водосборным бассейнам

Название	Площадь, км <sup>2</sup>	Среднее значение начала вег.сезона, день	Среднее значение максимума вег.сезона, день	Среднее значение конца вег.сезона, день	Среднее значение длительност и вег.сезона, день
Большой Пит	21598,19	0,40049	0,20410	-0,44850	-0,78278
Гаревка	926,88	0,14585	0,19688	-0,73097	-0,80674
Кас	11816,19	-0,08687	0,21615	0,01788	0,15449
Сым	31327,03	-0,16943	0,13271	-0,45987	-0,25582
Вороговка	3757,63	-0,17479	0,18912	-0,90578	-0,62737
Дубчес	14661,31	-0,24801	0,09089	-0,72593	-0,44872
Подкаменная Тунгуска	238699,42	-0,30028	0,07864	-0,58809	-0,23909
Бахта	35898,20	-0,37585	-0,21589	-0,53673	-0,09814
Елогуй	25393,38	-0,27517	0,06204	-0,28194	0,03395
Комса	1666,67	-0,45406	-0,13671	-0,58910	-0,10500
Сухая Тунгуска	7165,00	-0,47917	-0,17548	-0,24109	0,29440
Нижняя Тунгуска	475435,99	-0,66464	-0,19079	-0,09778	0,60474
Мироедиха	552,14	-0,80038	-0,13394	-0,00109	0,87028

Продолжение таблицы 3

Название	Площадь, км <sup>2</sup>	Среднее значение начала вег.сезона, день	Среднее значение максимума вег.сезона, день	Среднее значение конца вег.сезона, день	Среднее значение длительност и вег.сезона, день
Турухан	35726,21	-0,73630	-0,14159	-0,10638	0,68208
Курейка	46600,21	-0,84064	-0,07961	0,49564	1,35069
Игарка	1662,36	-1,06564	-0,14815	-0,02577	1,05517
Гравийка	323,43	-0,93311	-0,31711	0,06080	1,01828
Хантайка	32150,28	-1,01832	-0,30951	0,32345	1,33860
Фокина	342,56	-0,97414	-0,65098	0,35533	1,32753
Дудинка	5705,16	-0,97938	-0,34926	0,32129	1,30078
Большая Хета	20799,63	-0,42636	-0,01245	0,25325	0,68315
Малая Хета	5942,46	-0,54388	-0,13859	0,61034	1,15471
Сухая дудинка	1903,08	-1,22879	-0,07357	0,80736	2,02683

С помощью полученных графиков на рисунках 14 - 18 мы можем определить и сравнить значения NDVI, дату начала роста, пика, старения и продолжительности жизни растительности по классификации TerraNotrhe RLC 2011 по 23 водосборным бассейнам. В таблице 3, водосборные бассейны отсортированы по географическому расположению от 57° до 65° северной широты и можно отметить, что у южных водосборных бассейнов идет уменьшение длительности вегетационного сезона за период с 2001 по 2013 год. Начиная с 65° с.ш. идет увеличение длительности вегетационного сезона.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения исследования были составлены характеристики NDVI и фенологических дат в виде слоев данных ГИС, карт и графиков временной динамики этих показателей, как для каждого водосборного бассейна, так и в пределах распространения основных типов растительности северных территорий бассейна р. Енисей.

На основе полученных результатов мы можем определить значение максимума NDVI, дат начала роста, пика, конца и длительности вегетационного сезона для типов растительности по классификации TerraNorthe RLC2011, посмотреть по картам распределение полученных характеристик NDVI и фенологических дат 23 водосборных бассейнов рек севера Средней Сибири. По картам тренда фенофаз можно рассмотреть территориальную зависимость, например, у водосборных бассейнов до 65° с. ш. идет уменьшение длительности вегетационного сезона, а от 65° с. ш. до 70° с. ш. идет увеличение длительности вегетационного сезона.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Churkina G. Spatial analysis of growing season length control over net ecosystem exchange / G. Churkina, D. Schimel, B.H. Braswell, X. Xiao // *Global Change Biology* – 2005. – № 11. – P. 1777-1787.
- 2 Rechid D. Parameterization of snow-free land surface albedo as a function of vegetation phenology based on MODIS data and applied in climate modeling / D. Rechid, T.J. Raddatz, D. Jacob // *Theoretical and Applied Climatology*, – 2009. – V. 95 № 3. – P. 245-255.
- 3 Cooke, J.E.K., Weih, M. Nitrogen storage and seasonal nitrogen cycling in *Populus*: Bridging molecular physiology and ecophysiology / J.E.K. Cooke, M. Weih // *New Phytologist* – 2005. – № 167. – P. 19-30.
- 4 Heimann, M. Evaluation of terrestrial Carbon Cycle models through simulations of the seasonal cycle of atmospheric CO<sub>2</sub>: First results of a model intercomparison study / M. Heimann, G. Esser, A. Haxeltine, J. Kaduk, D.W. Kicklighter, W. Knorr // *Global Biogeochemical Cycles* – 1998. – V. 12, № 1. – P. 1-24.
5. Cleland, E.E. Shifting plant phenology in response to global change / E.E. Cleland, I. Chuine, A. Menzel, H.A. Mooney, M.D. Schwartz // *Trends in Ecology & Evolution* – 2007 – № 22 – P. 357-365.
- 6 USGS Reverb [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>
- 7 Jarvis, A. Practical use of SRTM data in the tropics—comparisons with digital elevation models generated from cartographic data / A. Jarvis, J. Rubiano, A. Nelson, A. Farrow, M. Mulligan // *Working document* – 2004. – № 198. – P. 32.
- 8 NDVI - теория и практика [Электронный ресурс] – ГИС Лаборатория, GIS-Lab. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>
- 9 Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m [Электронный ресурс]: The Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). – Режим доступа: [https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mod13q1](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1)

10 Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 500 m SIN Grid [Электронный ресурс]: The Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). – Режим доступа:

[https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mcd12q2](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mcd12q2)

11 Schaaf B. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS / C. B. Schaaf, F. Gao, A.H. Strahler, W. Lucht, X. Li, T. Tsang, N.C. Strugnell, X. Zhang, Y. Jin, Jan-Peter Muller, P. Lewis, M. Barnsley, P. Hobson, M. Disney, G. Roberts, M. Dunderdale, C. Doll, R.P. d'Entremont, B. Hu, S. Liang, J.L. Privette, D.Roy // Remote Sensing of Environment – 2002. – № 83 – P.135-148.

12 Zhang X. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements / X. Zhang, M.A. Friedl, C.B. Schaaf // Journal of Geophysical Research – 2006. – V. 111 (G04).

13 Zhang X. Monitoring vegetation phenology using MODIS / X. Zhang, M.A. Friedl, C.B. Schaaf, A.H. Strahler, J.C.F. Hodges, F. Gao // Remote Sensing of Environment – 2003. – V. 84 – P. 471-475.

14 Ganguly, S. Land surface phenology from MODIS: Characterization of the Collection 5 global land cover dynamics product / S. Ganguly, M.A. Friedl, B. Tan, X. Zhang, M. Verma // Remote Sensing of Environment – 2010. – V.118, № 8. – P. 1805-1816.

15 Friedl, M. A. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment – 2010. – V. 114, № 1. – P. 168-182.

16 Барталёв, С. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрометра MODIS / С.А. Барталев, В.А. Егоров, Д.В. Ершов, А.С. Исаев, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, И.А. Уваров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8 – № 4 – С. 285-302.