

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

« ____ » _____ 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Гравиметрическая спутниковая съемка в анализе воздействий изменений
климата на леса бореальной зоны

09.04.01 Информатика и вычислительная техника
09.04.01.07 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в мониторинге
природных и антропогенных экосистем

Научный руководитель	_____ зав. каф Б-ГИС, д.б.н., проф. подпись, дата должность, ученая степень	В.И. Харук
Выпускник	_____ подпись, дата	С.Ш. Исаев
Рецензент	_____ С. Н .С., К. Т. Н. подпись, дата	С. Т. Им
Нормоконтролер	_____ подпись, дата	Е.В. Федотова

Красноярск 2017

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

« _____ » _____ 2017 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации**

Студенту Исаеву Сардору Шакиржановичу

Группа: КИ15-01-07М Направление (специальность): 09.04.01

Информатика и вычислительная техника

Тема выпускной квалификационной работы: «Гравиметрическая спутниковая съемка в анализе воздействий изменений климата на леса бореальной зоны»

Утверждена приказом по университету № 5833/с от 29.04.2016 г.

Руководитель ВКР: Харук В. И., д. б. н., профессор кафедры Б-ГИС

Исходные данные для ВКР: GRACE (2002-2015 гг.), SPEI v. 2.4 (2002-2015 гг.), CRU TS v. 3.24 (2002-2015 гг.)

Перечень разделов ВКР: введение; обзор предметной области исследования; исходные данные и методы их обработки; программное обеспечение; практическая часть; заключение; список использованных источников.

Перечень графического материала: слайды презентации.

Руководитель ВКР

подпись

В. И. Харук

Задание принял к исполнению

подпись

С. Ш. Исаев

« ____ » _____ 2017 г.

АННОТАЦИЯ

Изменении климата, включающем увеличение средней годовой температуры, вызывающей таяние ледников, и повышение уровня Мирового океана, также разбалансировка всех природных систем, которая приводит к изменению режима выпадения осадков, температурным аномалиям и изменениям растительного покрова.

Используя гравиметрические спутниковые данные были выполнены ряд следующих работ.

В ходе работы были построены карты корреляции аномалий водного эквивалента масс (АВЭМ) и осадков для Северной Америки и Северной части Евразии. Построены карты корреляции АВЭМ и индекса сухости. Построены карты корреляции АВЭМ и температур для большей части территории наблюдается убывающая корреляция. Построены карты трендов АВЭМ для Северной Америки, выделились три зоны интереса, для этих зон был построен график динамик.

Построена карта трендов АВЭМ для Северной части Евразии где выделили три зоны совпадения значений с картой прогноза изменения влажности почвы рисунок (4.2.28).

Построена карта трендов по летним месяцам (июнь-август) для Северной Америки и Северной части Евразии с 2002 по 2015 год. Построен график среднелетний динамики водной массы, индекса сухости, температур и осадков с 2002 по 2015 год для Северной Америки и Северной части Евразии, по графику определили самые засушливые года и построены года минимумов АВЭМ и индекса сухости для этих территорий. Построены графики минимумов годов с 2002 по 2015г для Северной Америки.

ГРАВИМЕТРИЧЕСКАЯ СПУТНИКОВАЯ СЪЕМКА, ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА, БОРЕАЛЬНЫЕ ЛЕСА, GRACE, SPEI, CRU TS, АНОМАЛИИ ЭКВИВАЛЕНТА ВОДНЫХ МАСС, АВЭМ.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Обзор предметной области исследования	9
1.1 Объект исследования	9
1.2 Анализ изменения воздействий климата на леса бореальной зоны	10
1.3 Обзор литературы по вопросам взаимосвязи лесного покрова и климата	11
2. Исходные данные и методы их обработки	22
2.1 Прибор дистанционного зондирования GRACE	22
2.2 Модельные данные CRU TS и SPEI	24
2.3 Методика работы и анализ	27
3 Программное обеспечение	29
3.1 ArcGIS	29
3.2 ERDAS Imagine	30
3.3 Статистика	31
4 Практическая часть	31
4.1 Подготовка данных	31
4.2 Результат оценки связи динамики АВЭМ с климатическими изменениями и прогнозами на территории лесов бореальной зоны	35
Заключение	58
Список использованных источников	60

ВВЕДЕНИЕ

Изменении климата, включающем увеличение средней годовой температуры, вызывающей таяние ледников, и повышение уровня Мирового океана. Помимо потепления, происходит также разбалансировка всех природных систем, которая приводит к изменению режима выпадения осадков, температурным аномалиям и изменениям растительного покрова.

Может показаться, что умеренное потепление оказывает позитивное воздействие на рост деревьев и лесов, в особенности в условиях короткого сезона вегетации и там, где температура является ограничивающим фактором для развития растений. Кроме того, рост концентрации CO₂ в атмосфере способствует более активному росту растений, поскольку углекислый газ и вода являются необходимыми веществами для фотосинтеза – процесса, с помощью которого растения «усваивают» солнечную энергию.

Тем не менее, фактическая реакция бореальных лесов на глобальное потепление не является однозначной. Более теплая погода на протяжении последних десятилетий отразилась на росте деревьев либо позитивно, либо негативно, в зависимости от региона, типа места произрастания и породы. Во многих частях бореальной зоны наблюдается массовое угнетающее воздействие теплой погоды на леса. В некоторых случаях это связано с засухами, связанными с ростом температуры.

Данные гравиметрической спутниковой миссии GRACE используются для изучения гравитационного поля Земли и его временных вариаций, связанных, в частности, с процессами изменения климата, в основном исследования касаются водоемов Земли, ледников, океана, землетрясений, изучений деформаций земной коры. На данный момент гравиметрические данные также активно применяются для изучения водных бассейнов, засух и лесных территорий [1].

Цель: анализ динамики водной массы на территории лесов бореальной зоны на основе данных гравиметрической съемки GRACE.

Задачи:

- оценка динамики аномалий эквивалентов водной массы зоны бореальных лесов;
- оценка согласования наблюдаемой динамики с климатическими изменениями и прогнозами климатических изменений.

1 Обзор предметной области исследования

1.1 Объект исследования

Бореальные леса – это крупнейшая непрерывная наземная экосистема на Земле, покрывающая около 14% территории суши, пригодной для произрастания растений. Бореальные леса формируют своего рода «зеленый пояс», охватывающий Северное полушарие полосой разной ширины и проходящий через Россию, Аляску, Канаду и Скандинавию, приблизительно между 45 и 70 град. северной широты. Общая площадь бореальных лесов составляет около 1.4 млрд га, или 38% от общей лесопокрытой площади мира. Большая часть бореальных лесов планеты находятся в России. К северу от зоны бореальных лесов расположена безлесная зона тундры. К югу граница перехода не так выражена: там формируется переходная зона, которая формирует постепенный переход к зоне умеренных широколиственных лесов [1].

Одним из самых важных экологических факторов, определяющим бореальный характер этих лесов, является продолжительное наличие снежного покрова в зимние месяцы, который предохраняет почву от низких температур, тем самым, создавая микроклимат, играющий важную роль для выживания многих растений и животных. Тем не менее, во многих районах произрастания бореальных лесов почва промерзает, а во многих районах, преимущественно в Сибири растет на вечной мерзлоте. Приблизительно половина площади бореальных лесов по-прежнему относится к мало нарушенным лесам, которые пока подвергаются незначительному воздействию лесохозяйственных мероприятий и другой антропогенной деятельности. В целом, крупнейшие массивы мало нарушенных лесов находятся в отдаленных и очень малонаселенных районах Севера, причем чем южнее расположен лесной массив, тем большему антропогенному воздействию он подвергается. Более половины мало нарушенных лесов

планеты – это бореальные леса России и Канады. К самым интенсивно используемым бореальным лесам относятся леса Скандинавии и западной части России, где старо-возрастные леса сохранились лишь кое-где на особо охраняемых природных территориях. Бореальные леса – это не только источник древесины, но и ряда важных экосистемных услуг, таких, например, как чистая вода. Более того, они оказывают регулирующее действие на климат планеты, главным образом, обеспечивая баланс теплового излучения и играя важную роль в глобальном углеродном цикле [1].

1.2 Анализ изменения воздействий климата на леса бореальной зоны

Не только изменение климата воздействует на леса: бореальная экологическая зона является ключевым регионом, чувствительным к изменениям окружающей среды, с одной стороны, а с другой стороны, обладающей таким размером, что она сама оказывает существенное воздействие на климатические условия. Воздействие бореальных лесов на климат определяется следующим:

- бореальные леса влияют на баланс поглощения и отражения тепловой энергии поверхностью земли, изменяя альбедо поверхности, которое зависит от характера землепользования, возникновения гарей, состава растительности;

- бореальные леса влияют на содержание парниковых газов в атмосфере, в зависимости от изменений, происходящих в бореальных лесах, они могут как поглощать, так и выделять углерод в атмосферу;

- бореальные леса поддерживают водный баланс.

Во многом воздействие бореальных лесов на климат определяется способностью лесов поглощать углерод из атмосферы и связывать его в биомассе и в почве. В бореальных лесах находится около 27% углерода,

содержащегося во всей растительности планеты, и от 25 до 30% почвенного карбона планеты. Вместе с тундрой, бореальный леса представляют собой крупнейший на Земле резервуар углерода, который содержится в основном в органических веществах лесной подстилки. Равнинные бореальные леса, расположенные непосредственно к югу от зоны вечной мерзлоты, связывают большее количество углерода в органических веществах в почве, чем какая-либо другая экосистема Земли. Тем не менее, согласно ряду исследований, бореальные леса в целом способствуют потеплению климата, поскольку их воздействие в части поглощения углерода почвой и растительностью нейтрализуется активным поглощением солнечной радиации темным лесным пологом [1].

1.3 Обзор литературы по вопросам взаимосвязи лесного покрова и климата

В статье [2] автор исследует сравнительную характеристику зарубежных индексов оценки засухи по основным зерносеющим субъектам европейской территории России. Для слежения за изменением условий засушливости на длительных временных интервалах во многих странах мира широко используется индекс Палмера PDSI (Palmer Drought Severity Index), предложенный в 1965 г. Этот показатель рассчитывается на основе метеорологических данных (температуры воздуха и осадков), а также локальных констант, характеризующих влагоемкость почвы. С помощью входных величин определяется схема влагопереноса в почве с учетом реальных и потенциальных значений эвапотранспирации, а также другие составляющие водного баланса, и рассчитывается индекс засухи Палмера [2].

В этой же работе для расчета индекса была разработана специальная программа. Алгоритм программы построен по методике расчета индекса Палмера, которая подробно описана в работе W. Alley (1984). В последнее десятилетие широкое распространение получил стандартизованный индекс

осадков (Standardized Precipitation Index, SPI), рекомендованный ВМО национальным метеорологическим службам для мониторинга засух (McKee et al., 1993). Этот индекс в равной степени эффективен как при анализе влажных периодов/циклов, так и при анализе сухих периодов/циклов. Полученный набор данных преобразуется в нормальное распределение, используя метод аппроксимации. Положительные значения SPI указывают на сумму осадков выше среднего, а отрицательные — ниже среднего [2].

Так как на наличие засухи и ее интенсивность влияет не только количество осадков, но и температура воздуха, то С. М. Висенте- Серрано в 2010 г. был предложен стандартизованный индекс «осадки — испарение» (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI). С вероятностной точки зрения данный индекс аналогичен стандартизованному индексу осадков SPI. Однако вместо осадков для вычисления SPEI используется разность месячных сумм осадков и потенциальной эвапотранспирации. Эта особенность индекса может оказаться полезной при анализе происходящих изменений засушливости в условиях глобального потепления [2].

Для проведения расчетов было выбрано 10 областей, расположенных в основных зерносеющих регионах Центральной России: Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Тамбовская, Пензенская, Самарская, Саратовская, Ульяновская и Волгоградская. Поскольку наибольший ущерб урожаю основных ранних зерновых культур наносят поздние весенние и летние засухи, для исследования был выбран период с мая по июль. Оценки интенсивности и распространения засух по некоторым регионам России по индексу Палмера представлены в работе Хлебниковой и др. (2012), а по SPI — в работе Клещенко, Савицкой (2014). Оценка засух по SPEI была выполнена нами по отдельным субъектам РФ (Задорнова, 2013). В настоящей работе приведен результат сравнительного анализа трех показателей оценки засухи между собой, которые, в свою очередь, были сопоставлены с оценкой засухи по гидротермическому коэффициенту Г. Т. Селянинова (ГТК),

используемому в ЦМЗ ФГБУ «ВНИИСХМ» для оценки интенсивности засух. По всем исследуемым областям были получены результаты расчета засух за период 1992—2013 гг. с оценками их интенсивности [2].

Для более точного учета текущих погодных условий необходимо использовать комплекс показателей оценки засушливости. Сравнительный анализ индексов SPI, SPEI, PDSI подтвердил, что все эти показатели объективно определяют наличие засухи в регионах с частой ее повторяемостью (Волгоградская, Саратовская, Самарская, Тамбовская, Липецкая области) [2].

В статье [3] автор исследует связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли по данным съемок спутниками GRACE. Для изучения статистических связей между ТЭСВ по данным GRACE (Swenson, 2012) и запасами продуктивной влаги использованы результаты наземных измерений на тестовых участках Северного Казахстана (Спивак, Муратова, 2011). Пробы почв отбирались помощью ручного почвенного бура. Влажность проб определялась термостатно весовым методом (Инструкция..., 2006). Продуктивная влага выражена толщиной в сантиметрах слоя воды, что позволяет сопоставлять ее запасы с данными GRACE, а также с метеорологическими данными о количестве осадков, которые также указываются в виде толщины слоя воды [3].

Использованы 104 наземных измерения влажности почв в трех слоях на глубинах 0–0,2 м, 0,2–0,5 м и 0,5–1,0 м. Точки отбора проб обеспечены GPS-координатами. Измерения выполнялись с 2006 по 2008 гг. в период с мая по октябрь. Точечные измерения усреднялись по площади каждого из исследуемых участков. Эти усредненные значения влажности почв использовались в дальнейшем анализе [3].

Помимо данных о запасах продуктивной влаги в исследовании использованы результаты метеорологических наблюдений (Данные..., 2015; Global..., 2015), выполненных на метеостанциях, ближайших к участкам, на которых измерялась влажность почв. Для сопоставления привлекались такие

параметры, как температура воздуха на высоте 2 м от поверхности земли, количество осадков, высота снежного покрова [3].

Сопоставление данных системы GRACE с результатами наблюдений на метеостанциях, расположенных вблизи рассматриваемых участков показало, что вариации поля силы тяжести имеют строгую связь как с толщиной снежного покрова, так и с температурой воздуха на высоте 2 м над земной поверхностью. При этом анализ кросс-корреляций показал, что ТЭСВ по GRACE изменяется синфазно с толщиной снежного покрова. В то же время, имеется 2-х месячный фазовый сдвиг между ТЭСВ по GRACE и температурой воздуха. При этом ТЭСВ по GRACE опережает температуру воздуха. Это не противоречит известному факту, что повышение средней температуры воздуха вызывает активное снеготаяние и сток талой воды, что приводит к уменьшению поля силы тяжести [3].

В статье [4] автор использует данные спутниковой гравиметрии для изучения влага запаса снежного покрова европейской части России. Сезонный снежный покров является одним из важнейших компонентов водного баланса для Европейской части России (ЕЧР). Однако его оценка на основании наземных наблюдений или данных дистанционного зондирования сопряжена с множеством трудностей. Рассматривается возможность применения данных об изменении бассейновых влага запасов, включающих подземные и поверхностные воды, а также ее твёрдую фазу, для оценки содержания воды в снежном покрове (S) речных бассейнов на ЕЧР [4].

Используя представленные в результаты расчёта статистической структуры снежного покрова на ЕЧР, можно полагать что относительная погрешность распространения измерения одной станции средней величины влага запаса снежного покрова на площадь 30 000 км² составляет примерно 15-20% [4].

Существуют три основных центра обработки первичной информации со спутников GRACE: Center for Space Research (CSR), Jet Propulsion Laboratory (JPL) и Geo Forschungs Zentrum Potsdam (GFZ), их результаты

использовались в данной работе. Также отдельно для каждого узла сетки рассчитывались средние значения TWS по информации из трёх центров. Кроме того, в качестве исходных использовались данные всех четырех типов, дополнительно откорректированные с помощью поправочных коэффициентов из архива GLDAS-2 и среднее из них. Таким образом, для каждого узла градусной сетки было получено 8 рядов данных за 2002-2011 гг. со значениями TWS: три не откорректированных ряда из различных источников (CSR, JPL и GFZ), три ряда с учетом поправочных коэффициентов GLDAS и два, соответствующих их средним значениям [4].

Географические факторы связи между наземными измерениями влага запасов снега и общими влага запасами по данным GRACE. Для дальнейшего анализа были выбраны данные JPL, которым соответствует наибольший коэффициент корреляции. На их основе можно судить об особенностях пространственного распределения TWS по территории ЕЧР. Для иллюстрации особенностей временного хода бассейновых влага запасов в различных природных зонах были сопоставлены два временных ряда TWS [4].

Сезонная и межгодовая изменчивость TWS в бассейне Нижней Волги превосходят соответствующую в районе Печоры. В многолетнем плане это хорошо согласуется с распределением C_v для среднегодовых осадков и испарения. Для разных лет величина TWS на момент начала снегонакопления различна. Однако из-за низкого временного разрешения данных достаточно точно определить дату начала снегонакопления и соответственно величину TWS невозможно. Попытка учесть влияние предзимнего увлажнения территории, вычтя из значений TWS за ноябрь-апрель, значение TWS в октябре (как характеристику предзимнего увлажнения) к росту коэффициента корреляции не привела [4].

Данная проблема является дополнительным источником погрешности при определении связи между бассейновыми влага запасами и влага запасами снежного покрова. Для зоны избыточного увлажнения, к которой относится

бассейн Печоры, с устойчивым сезонным ходом TWS это не столь существенно, как для засушливой зоны, в нашем случае – бассейна Нижней Волги [4].

Помимо климатических причин, особенности сезонного хода TWS в бассейне Нижней Волги могут быть обусловлены изменением объёма воды в Саратовском и Волгоградском водохранилищах.

Пространственное разрешение данных GRACE не позволяет отдельно оценить изменение величины бассейновых влага запасов, связанное со обработкой /наполнением водохранилищ, при этом, не учитывая изменений, связанных с общим изменением увлажнённости бассейна. Это так же является одним из факторов, обуславливающих невысокое r для данного района.

Небольшие величины r (0,25-0,5) на северо-западе ЕЧР при относительно устойчивом росте S в течение зимы, вероятно, объясняются большим количеством озёр на данной территории, изменение объёма воды в которых и играет главную роль в динамике TWS. Наибольшие же значения r на северо-востоке обусловлены несколькими причинами. К ним относятся устойчивая зима с максимальной для ЕЧР средней мощностью снежного покрова, относительно малая мощность зоны аэрации, которая обуславливает небольшой диапазон колебания уровня грунтовых вод, а также средняя озёрность (2-3%) и небольшая многолетняя изменчивость W , X и E [4].

Исследована возможность применения данных GRACE при оценке общих бассейновых влага запасов для получения информации о влага запасе снежного покрова. Для согласованности TWS и S выбор центра обработки данных (CSR, JPL, GFZ) не играет большой роли. При этом поправочные коэффициенты для данных GRACE, полученные по данным архивам GLDAS, в большинстве случаев снижают величину коэффициента корреляции между общими бассейновыми влага запасами влага запасом снежного покрова. Характер пространственно-временной изменчивости TWS согласуется с прочими членами водного баланса. При отсутствии оттепелей наблюдается

тесная связь величин TWS и S в течение отдельных зим, а в течение более длительного периода, при отсутствии значимой многолетней изменчивости TWS. Применение данных GRACE ограничено, в основном, их низким разрешением и необходимостью дополнительного использования данных по другим элементам водного баланса [4].

В статье [5] автор изучает оценку пространственно-временного распределения засухи на Украине в вегетационный период. Проблема мониторинга засушливых явлений в условиях глобальных климатических изменений остается неизменно актуальной как в научных исследованиях, так и прикладных задачах. Засуха как комплексное явление, связанное с влажностью почвы и возникающее в результате дисбаланса осадков, испарения и стока, сложно поддается описанию с помощью какого-либо одного метеорологического параметра. Поэтому наряду с простыми оценками, связанными с определением нормы осадков или их аномалий, в настоящее время проводятся работы по построению комплексных показателей или индексов, способных выявить как само явление засухи, так и его интенсивность (Хлебникова и др., 2012). Оценка засушливости условия на территории Украины в период 1995—2012 гг. с помощью двух стандартизированных индексов осадков, которые благодаря своей простоте и эффективности получили широкое распространение при изучении засух [5].

Стандартизированный индекс осадков (the Standardized Precipitation index, SPI), рекомендованный ВМО для мониторинга засух (WMO, 2009), был предложен в работе McKee T.V. et al. (1993) и базируется на использовании временных рядов месячных сумм осадков [5]. Процедура расчета включает преобразование временных рядов осадков с применением гамма-распределения, а затем нормирование полученных вероятностей в стандартизированный индекс осадков [5].

Для расчета SPI длина ряда осадков должна быть не менее 30 лет. С помощью SPI для каждого конкретного пункта можно определить вероятность возникновения засухи той или иной интенсивности. Начало

засухи может быть установлено, когда значение SPI становится ниже -1.0 , окончание засухи определяется моментом времени, когда индекс становится положительным. Интенсивность засухи следует рассчитывать, как сумму всех значений SPI в период засухи. SPI может определяться для различных периодов времени. Шаг в один месяц (SPI1) означает, что для расчета используются данные по осадкам только за один месяц, потому временное распределение SPEI1 имеет сходство с распределением месячных сумм осадков [5].

Методика расчета и применения SPI предусматривает принятие, по крайней мере, двух предположений. Во-первых, изменчивость осадков считается значительно большей, чем других параметров (например, температуры или эвапотранспирации), которые влияют на образование засухи. Во-вторых, другие параметры стационарны, то есть не имеют временного тренда. Поскольку засуху как комплексное явление, формирует не только режим осадков, но и температурный режим, учет температуры должен существенно повысить качество SPI. Эта задача была решена в работах Vicente-Serrano et al [6].

Процедура расчета SPEI включает преобразование временных рядов с использованием трехпараметрического лог-логистического вероятностного распределения. Значения индекса SPEI, как и SPI, стандартизируются для возможности сравнения с другими величинами в разных географических пунктах и на разных промежутках времени. Критерии для определения засушливых или влажных условий [5].

В выполненных для территории Украины исследованиях засушливых явлений с применением индекса SPEI показано, что во второй половине XX века и в начале текущего столетия максимальное количество засух наблюдалось в последние тридцать лет (1981—2010 гг.), при этом очаг максимальной повторяемости интенсивных засух располагалась в южных и юго-западных (Черновицкой, Одесской и Николаевской) областях (Хохлов, Ермоленко, 2012) [5].

В данном исследовании проведен анализ пространственно-временного распределения стандартизированных индексов осадков SPI и SPEI в вегетационный период 1995—2012 гг. для территории Украины. Были использованы значения SPI в узлах регулярной сетки с шагом 2.5 градуса IRI-анализа (International Research Institute for Climate and Society) для одного (SPI1) и трех (SPI3) месяцев. Для оценки засушливых условий было выполнено зональное осреднение индекса по трем широтным кругам, которые принадлежат к основным агроклиматическим зонам Украины — степь, лесостепь и полесье. Исходная информация для анализа режима засушливости с помощью индекса SPEI взята из глобальной базы (The Global SPEI database), которая базируется на месячных данных об осадках и потенциальной эвапотранспирации CRU (Climatic Research Unit, University of East Anglia) (Vicente-Serrano S.M. et al., 2010b). Данные SPEI в узлах регулярной сетки с шагом 0.5 градусов для периодов три (SPEI3) и семь (SPEI7) месяцев усреднялись по пяти агроклиматическим зонам степь, лесостепь, полесье, Карпаты, Крым [5].

Сравнительный анализ индексов SPI и SPEI на разных временных масштабах показал, что наиболее обширные и интенсивные засухи в Украине наблюдаются весной и в начале лета. В этот период чаще случаются умеренные засухи, которые охватывают практически все агроклиматические зоны и в некоторых из них достигают критериев сильной. В апреле 2009 г. По всем зонам зафиксирована экстремальная засуха. Летом уменьшается пространственный масштаб засух при общем сохранении интенсивности. В осенний период интенсивность засух уменьшается, но они становятся более распространенными, чем летом. Индекс SPEI повышает надежность выявления засух в жарких районах с недостаточным и неустойчивым режимом увлажнения, что присуще степной и лесостепной зонам Украины. Индекс SPI целесообразнее использовать в северных районах, где температурный режим умеренный, а увлажненность, в среднем, выше. Оба

показателя хорошо согласовываются по интенсивности в ярко выраженные, длительные засушливые периоды [5].

В статье [6] автор исследует тренд общей обводненности европейской части России по выявленным спутниковым данным GRACE. На основе информации, полученной со спутниковой системы GRACE, проведен анализ динамичности общей обводненности территории за период с 2003–2012 гг. Сравнивались спутниковые данные с информацией о динамике уровня грунтовых вод по отдельным скважинам. Для контроля и сравнения использовано 12 скважин, равномерно распределенных по региону исследований (Центральный Федеральный и Северо-Кавказский Федеральный округа России). Для территории европейской части России выявлена хорошая ковариация между спутниковыми данными и глубиной грунтовых вод. Геоинформационный анализ тренда общей обводненности, полученного по спутниковым данным, показал, что он является положительным на северо-западе территории исследований и отрицательным на юге и юго-востоке. Обнаруживается периодичность в многолетних изменениях общей обводненности на всей территории исследований. Величина периода изменяется от 3 до 8–9 лет. Более длинные периоды наблюдаются в центре и на северо-западе европейской части России, а менее длинные – на севере и юго-востоке. Полученные данные свидетельствуют о том, что при сохранении выявленной периодичности, минимум обводненности на востоке Северного Кавказа, в Вологодской, Ярославской, Московской и Костромской областях будет достигнут в 2016 гг., в центральной части региона исследований и Краснодарском крае в 2018–2019 гг., в Кировской области и Пермском крае в 2016–2017 гг [6].

В качестве объекта исследований выступает европейская часть России, которая характеризуется широким спектром природных условий и обводненности территории, а также большой территориальной разнонаправленностью ее изменений [6].

В качестве основного информационного источника использовали результаты измерений, полученные со спутниковой системы GRACE. В качестве побочного продукта выступает возможность анализа динамики всех процессов на земной поверхности и под ней, которые изменяют гравитационное поле Земли. Большая часть этих процессов связана с динамичностью водных масс (Wahr et al., 1998; Tapley et al., 2004; Swenson, Wahr, 2005; Landerer, Swenson, 2011) [6].

Для анализа использовали ежемесячные данные GRACE с пространственным разрешением 100 км за период с 2003 по 2012 гг.

На первом этапе провели анализ наличия тренда в анализируемых временных сериях каждой точки пространственных данных. Для оценки статистической значимости тренда использовали параметрический тест (Bryhn, Dimberg, 2011) [6].

После этого провели анализ выраженности периодичности во всех временных рядах спутниковых данных. Данный анализ проводили на основе визуального определения временных рядов, что было связано с недостаточностью информации для статистического анализа периодичности.

Для проведения статистического анализа использовали пакет Statistica6.0.

Результаты статистического анализа импортировали в ГИС ILWIS v.3.3, после чего в ГИС проводили их интерполяцию на территорию исследований с помощью метода скользящего среднего [6].

Кроме того, проводили сравнение спутниковых данных об ООТ с данными динамики уровня грунтовых вод по отдельным скважинам. Для контроля и сравнения использовали 12 скважин, равномерно распределенных по региону исследований (Центральный Федеральный и Северо-Кавказский Федеральный округа) [6].

Измерения уровня грунтовых вод проводили в конкретные дни с неравномерным временным шагом, поэтому их предварительно трансформировали в ежемесячные данные. Для этого каждому месяцу

приписывали минимальное (как наиболее значимое для ландшафта) значение уровня грунтовых вод из всех измерений конкретного месяца. В качестве меры сходства спутниковых данных и информации об уровне грунтовых вод использовали коэффициент корреляции величин годового минимума обоих показателей [6].

В результате проведенных исследований показано, что спутниковые данные GRACE об общей обводненности территории хорошо коррелируют с уровнем грунтовых вод [6].

Геоинформационный анализ тренда общей обводненности, полученного по спутниковым данным, показал, что он является положительным на северо-западе территории исследований и отрицательным на юге и юго-востоке.

Обнаруживается периодичность в многолетних изменениях общей обводненности. Величина периода изменяется от 3 до 8–9 лет. Более длинные периоды наблюдаются в центре и на северо-западе европейской части России, а менее длинные – на севере и юго-востоке [6].

При сохранении выявленной периодичности наступление ее очередного локального минимума в центре европейской части России и Краснодарском крае можно ожидать в 2018–2019 гг., а на севере европейской части России и Ставрополье – в 2015–2016 гг [6].

Дальнейшее накопление спутниковых данных GRACE даст возможность сделать прогнозы и оценки более точными [6].

2. Исходные данные и методы их обработки

2.1 Прибор дистанционного зондирования GRACE

Спутники-близнецы GRACE (Эксперимент по исследованию гравитационного поля и климата), разработанные NASA/DLR были запущены с космодрома Плесецк 17.03.2002. Спутники следуют один за

другим на расстоянии ~220 км по околополярной орбите на высоте ~500 км. Основными измеряемыми величинами являются расстояние между спутниками и его изменения под влиянием ускорений, обусловленных пролетами над притягивающими массами и другими причинами. Измеренные величины формируют данные первого уровня (Level 1). Их обработка включает определение орбит с использованием бортовых GPS, моделирование негравитационных эффектов с использованием измерений акселерометров, коррекцию за морские и земные приливы, за отклик океана и суши на изменения атмосферного давления и др. Результаты обработки формируют данные второго уровня (Level 2), представляющие собой ежемесячные наборы коэффициентов Стокса разложения внешнего гравитационного потенциала Земли вплоть до гармоник 60 (120) степени. CSR RL04 Level 2, данные представлены в виде набора коэффициентов Стокса C_{nm} , S_{nm} разложения геопотенциала по шаровым функциям [7].

$$V(\varphi, \lambda, r) = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi)$$

где n – степень,

m – порядок гармоники,

$P_n^m(\sin \varphi)$ – нормализованная присоединённая функция Лежандра,

a – средний экваториальный радиус Земли,

аргументы φ , λ , r – широта, долгота, радиус соответственно.

Используются данные до степени 60 включительно. Коэффициенты нулевой и первой степени равны нулю из-за выбора координатной системы, кроме того, GRACE не чувствителен к коэффициентам первой степени (геоцентру). В 2002-2003 проходила калибровка и настройка спутников, данные за этот период не так точны, как более поздние. Разность наблюдаемых

коэффициентов и модели (ΔC_{nm} , ΔS_{nm}) переводится в величины эквивалентного уровня воды (ЭУВ) с использованием выражения: [7].

$$\Delta h(\varphi, \lambda, t) = \frac{\rho_{ave}}{3\rho_w} \sum_{n=2}^{60} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} W_n (\Delta C_{nm}(t) \cos m\lambda + \Delta S_{nm}(t) \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi)$$

где ρ_{ave} ρ_w - средние плотности земли и морской воды соответственно,

k_n – нагрузочный коэффициент Лява n-й степени,

W_n – коэффициент фильтрации.

Разными авторами для устранения полос и уменьшения шума в ежемесячных данных по гравитационному полю GRACE используются гауссовская фильтрация, фильтры Винера, регуляризирующие фильтры, фильтры, устраняющие полосы, коэффициенты которых зависят не только от степени, но и от порядка. МССА может также применяться совместно с различными видами фильтрации [7].

2.2 Модельные данные CRU TS и SPEI

Данные CRU TS представляют собой ежемесячные поля с сеткой на основе ежедневных значений. Наборы данных TS (временные ряды) - это месячные вариации климата в течение последнего столетия или около того, которые были созданы Климатической исследовательской группой (CRU) в Университете Восточной Англии. Они рассчитаны на сетках с высоким разрешением (0,5x0,5 градусов), которые основаны на архиве среднемесячных температур, обеспечиваемых более чем 4000 метеорологическими станциями, распространенными по всему миру. Они позволяют изучать вариации климата и включать такие переменные, как облачный покров, дневной температурный диапазон, частоту морозного дня, осадки, среднесуточная температура, среднесуточная максимальная

температура, давление пара, потенциальная испарительная транспирация и частота влажного дня [8].

В настоящее время BADC (British Atmospheric Data Center) содержит последние данные Time Series, созданные CRU за период 1901-2015. Они доступны в виде данных CRU TS 3.24.1. BADC также содержит предварительные наборы данных CRU TS3.00 за период 1901-2006 гг., А также последующие базы данных CRU TS 3.10, CRU TS 3.20, CRU TS 3.21, CRU TS 3.22 и CRU TS 3.23 за периоды 1901-2009, 1901-2011, 1901-2012, 1901-2013 и 1901-2014 гг. [8].

Стандартизованный индекс осадков (the Standardized Precipitation index, SPI), рекомендованный ВМО для мониторинга 135 засух (WMO, 2009), был предложен в работе McKee T.B. et al. (1993) и базируется на использовании временных рядов месячных сумм осадков. Процедура расчета включает преобразование временных рядов осадков с применением гамма распределения, а затем нормирование полученных вероятностей в стандартизованный индекс осадков:

$$SPI = F^{-1}G(R) \quad (1)$$

где G — интегральная функция гамма-распределения;

R — количество осадков;

F^{-1} — обратное нормированное гауссово распределение.

Положительные значения SPI указывают на большее, чем в среднем, количество осадков, отрицательные значения — наоборот.

Начало засухи может быть установлено, когда значение SPI становится ниже -1.0 , окончание засухи определяется моментом времени, когда индекс становится положительным. Интенсивность засухи следует рассчитывать как сумму всех значений SPI в период засухи.

Методика расчета и применения SPI предусматривает принятие, по крайней мере, двух предположений. Во-первых, изменчивость осадков

считается значительно большей, чем других параметров (например, температуры или эвапотранспирации), которые влияют на образование засухи. Во-вторых, другие параметры стационарны, то есть не имеют временного тренда. Поскольку засуху как комплексное явление, формирует не только режим осадков, но и температурный режим, учет температуры должен существенно повысить качество SPI. Эта задача была решена в работах Vicente-Serrano et al. (2010) путем учета испаряемости с помощью показателя эвапотранспирации. Предложенный стандартизированный индекс осадков эвапотранспирации (the Standardized Precipitation Evapotranspiration index, SPEI) рассчитывается по процедуре, аналогичной расчету SPI. Однако вместо осадков для вычисления SPEI используются разницы (D) месячных сумм осадков (R) и потенциальной эвапотранспирации (PET):

$$D_i = R_i - PET_i \quad (2)$$

где i порядковый номер расчетного месяца.

Поскольку определение PET представляет сложную задачу, которая в полном решении предусматривает использование данных о влагосодержании воздуха и почвы, температурного режима поверхности почвы, радиационных потоков тепла в приземном слое и т. д., разработчики индекса SPEI воспользовались методом Торнтвейта (Thornthwaite, 1948), что сделало новый индекс почти таким же чувствительным к содержанию влаги в почве, как и индекс Палмера (Abramopoulos et al., 1988; Vicente-Serrano et al., 2010b). Процедура расчета SPEI включает преобразование временных рядов D с использованием трехпараметрического лог-логистического вероятностного распределения. Значения индекса SPEI, как и SPI, стандартизируются для возможности сравнения с другими величинами в разных географических пунктах и на разных промежутках времени [5].

2.3 Методика работы и анализ

Тренды — это математические функции, с помощью которых описывают данные. Тренды могут быть описаны различными уравнениями: линейными, логарифмическими, степенными и так далее. Линейный, логарифмический и экспоненциальный тренды хорошо подходят для описания тенденций роста и падения. В данной работе для подсчетов был использован линейный тренд:

$$y(x) = a + bx \tag{3}$$

где y — среднемесячные данные,

x — номер периода (порядковый номер месяца/ года),

a — точка пересечения с осью y на графике (минимальный уровень),

b — это значение, на которое увеличивается следующее значение временного ряда [9].

Корреляция — статистическая взаимосвязь двух или нескольких случайных величин (либо величин, которые можно с некоторой допустимой степенью точности считать таковыми). При этом изменения одной или нескольких из этих величин приводят к систематическому изменению другой или других величин. Мерой корреляции двух случайных величин служит коэффициент корреляции.

Коэффициент корреляции или парный коэффициент корреляции в теории вероятностей и статистике — это мера линейной зависимости двух случайных величин [10]. В таблице 1 представлены описания величин коэффициента корреляции и их интерпретация.

Таблица 1. Описания величин коэффициента корреляции

Значение коэффициента корреляции r	Интерпретация
$0 < r \leq 0,2$	Очень слабая корреляция
$0,2 < r \leq 0,5$	Слабая корреляция
$0,5 < r \leq 0,7$	Средняя корреляция
$0,7 < r \leq 0,9$	Сильная корреляция
$0,9 < r \leq 1$	Очень сильная корреляция

Коэффициент корреляции Пирсона применяется для исследования взаимосвязи двух переменных, измеренных в метрических шкалах на одной и той же выборке. Он позволяет определить, насколько пропорциональна изменчивость двух переменных. Данный коэффициент разработали Карл Пирсон, Фрэнсис Эджуорт и Рафаэль Уэлдон в 90-х годах XIX века. Коэффициент корреляции изменяется в пределах от минус единицы до плюс единицы. Коэффициент корреляции Пирсона характеризует существование линейной связи между двумя величинами. Если связь криволинейная, то он не будет работать. Чтобы приступить к расчетам коэффициента корреляции Пирсона, необходимо выполнение следующих условий:

- исследуемые переменные X и Y должны быть распределены нормально;
- исследуемые переменные X и Y должны быть измерены в интервальной шкале или шкале отношений;
- количество значений в исследуемых переменных X и Y должно быть одинаковым.

Величина коэффициента корреляции варьируется от 0 до 1.

Слабыми сторонами линейного коэффициента корреляции Пирсона являются:

- неустойчивость к выбросам;
- с помощью коэффициента корреляции Пирсона можно определить только силу линейной взаимосвязи между переменными, другие виды взаимосвязей выявляются методами регрессионного анализа [11].

Статистическая значимость результата представляет собой оцененную меру уверенности в его "истинности". То есть, р-уровень (этот термин был впервые использован в работе Brownlee, 1960) - это показатель, находящийся в убывающей зависимости от надежности результата. Более высокий р-уровень соответствует более низкому уровню доверия к найденной в выборке зависимости между переменными. Именно, р-уровень представляет собой вероятность ошибки, связанной с распространением наблюдаемого результата на всю популяцию. Например, р-уровень = 0.05 показывает, что имеется 5% вероятность, что найденная в выборке связь между переменными является лишь случайной особенностью данной выборки [12].

В данной работе, при статистическом анализе оценивались результаты соответствующие следующим уровням значимости, $p < 0.05$ и $p < 0.1$, так как ошибка от 5% до 10% для данной работы была приемлемой.

3 Программное обеспечение

3.1 ArcGIS

Большая часть работы была выполнена в программной среде ArcGIS, подготовка данных к работе, объединение каналов, расчеты трендов и корреляции.

Семейство продуктов под маркой ArcGIS подразделяется на настольные и серверные.

Основные продукты настольной линейки — ArcView, ArcEditor, ArcInfo. Каждый последующий включает функциональные возможности предыдущего. Кроме того, в настольную линейку входит бесплатные программы ArcReader (для просмотра данных, опубликованных средствами ArcGIS) и Arc GIS Explorer (облечённый настольный клиент для ArcGIS Server) [13].

Основной серверный продукт — ArcGISforServer, предназначен для многопользовательских геоинформационных проектов с централизованным хранилищем и неограниченным числом рабочих мест, публикации интерактивных карт в Интернете. Для публикации больших объёмов растровых данных выпускается продукт ImageServer, для хранения пространственных данных в СУБД и интеграции с другими информационными системами предназначен продукт ArcS DE. Кроме того, отдельными продуктами являются инструменты для разработчиков (Arc GIS Engine и Arc GIS Runtime). Поставляется также как отдельный программный продукт ArcPad геоинформационная система для карманных портативных компьютеров. Дополнительно поставляются многочисленные модули для продуктов ArcGIS, расширяющие функциональные возможности продуктов, модули расширения разрабатываются как ESRI, так и различными независимыми разработчиками [13].

3.2 ERDAS Imagine

В программной среде ERDAS Imagine была выполнена не значительная часть работы. ERDAS Imagine использовали для подготовки shape файлов бореальных лесов.

ERDAS Imagine – растровый графический редактор и программный продукт, первоначально разработанный компанией ERDAS Inc., и предназначенный для обработки данных дистанционного зондирования. В настоящее время продукт выпускает корпорация Intergraph. Продукт предназначен для работы с растровыми данными. Он позволяет обрабатывать, выводить на экран монитора и подготавливать для дальнейшей обработки в программных приложениях ГИС и систем автоматизированного проектирования (САПР) различные картографические изображения. ERDAS Imagine может также работать в режиме инструментального средства (Toolbox), позволяющего производить многочисленные преобразования

растровых картографических изображений и одновременно способного снабжать их географической информацией [14].

3.3 Статистика

Программа Statistica использовалась для подсчетов трендов и корреляции.

Statistica - программный комплекс, предназначенный для проведения статистического анализа и обладающий широчайшим набором функций. Таких как: разведочный анализ данных, корреляционный анализ, вероятностный калькулятор, быстрая основная и блоковая статистика, непараметрической статистики, ковариационного и дисперсионного анализов, применение множественной регрессии, таблиц частот, анализа многомерных откликов [15].

4 Практическая часть

4.1 Подготовка данных

Для выполнения практической части задания были скачены бесплатно-распространяемые данные GRACE (дата-центр GFZ) с официального сайта [16]. Представляющие собой среднемесячные АВЭМ, которые были помноженные на коэффициенты масштабирования (scale factor), для восстановления исходного сигнала. Среднемесячные данные были объединены в 1 файл, с помощью инструмента “Layerstacking” в ERDAS Imagine.

С сайта [17] были скачены среднемесячные данные SPEI, с сайта [18] CRU TS со среднемесячными данными температур и осадков, которые были также собраны в 1 файл.

Для визуализации данных по динамике водной массы на территории лесов бореальной зоны на основе данных гравиметрической съемки GRACE и SPEI, использовали градиентную раскраску. На рисунке 4.1.1 приведен пример градиентной раскраски для GRACE.

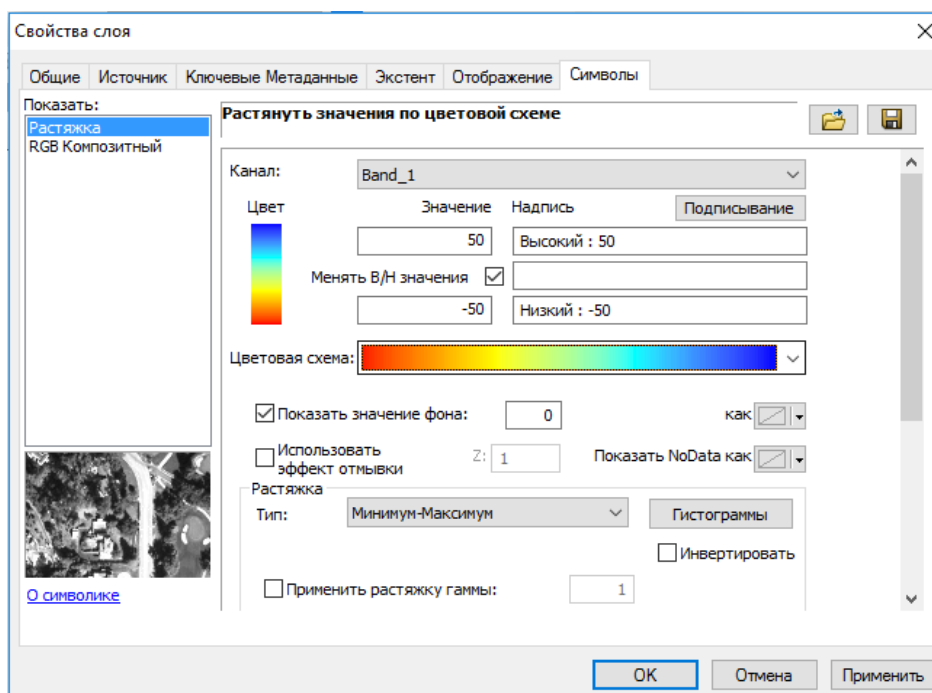


Рисунок 4.1.1 – Градиентная раскраска GRACE

Аналогичная раскраска выполняется для данных SPEI. Результаты градиентной раскраски GRACE и SPEI приведены на рисунках 4.1.2 и 4.1.3.

На рисунке 4.1.2 приведен результат градиентной раскраски GRACE за 2002 год.

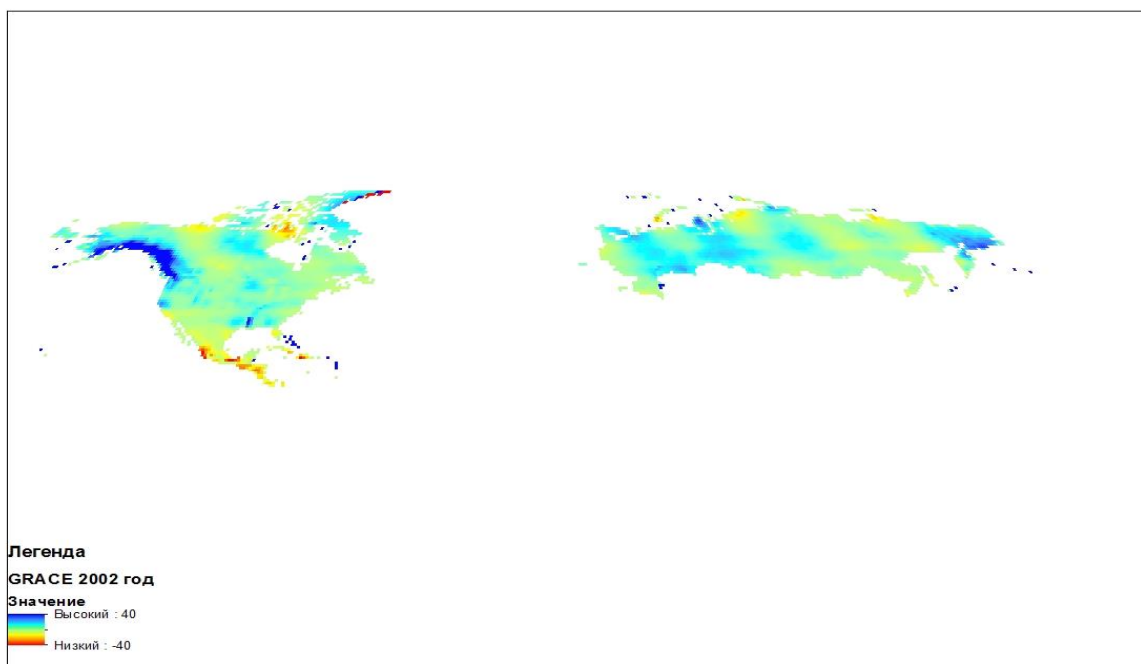


Рисунок 4.1.2 – Результат градиентная раскраска GRACE

На рисунке 4.1.3 приведен результат градиентной раскраски SPEI за 2002 год.

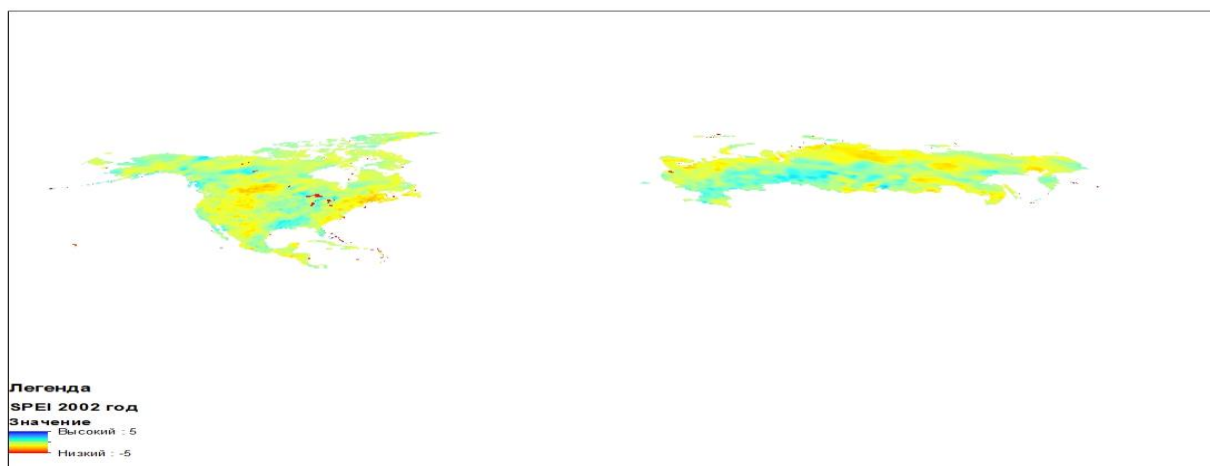


Рисунок 4.1.3 – Результат градиентная раскраска SPEI

Для корректного расчета корреляции требовалось, чтобы имелось временное помесечное совпадение между использующимися данными. Но так как в данных АВЭМ отсутствуют данные за июнь 2003 года, январь и июнь 2011 года, май и октябрь 2012 года и так далее, что связано с разного

рода сбоями или ремонтно-профилактическими работами, требовалось исключить соответствующие месяца в данных индекса сухости, температур и осадков, которых изначально присутствуют данные за все месяца с 2002 по декабрь 2015 года. Для сбора файла, использовался инструмент «объединить каналы» в arctoolbox, рисунок 4.1.4.

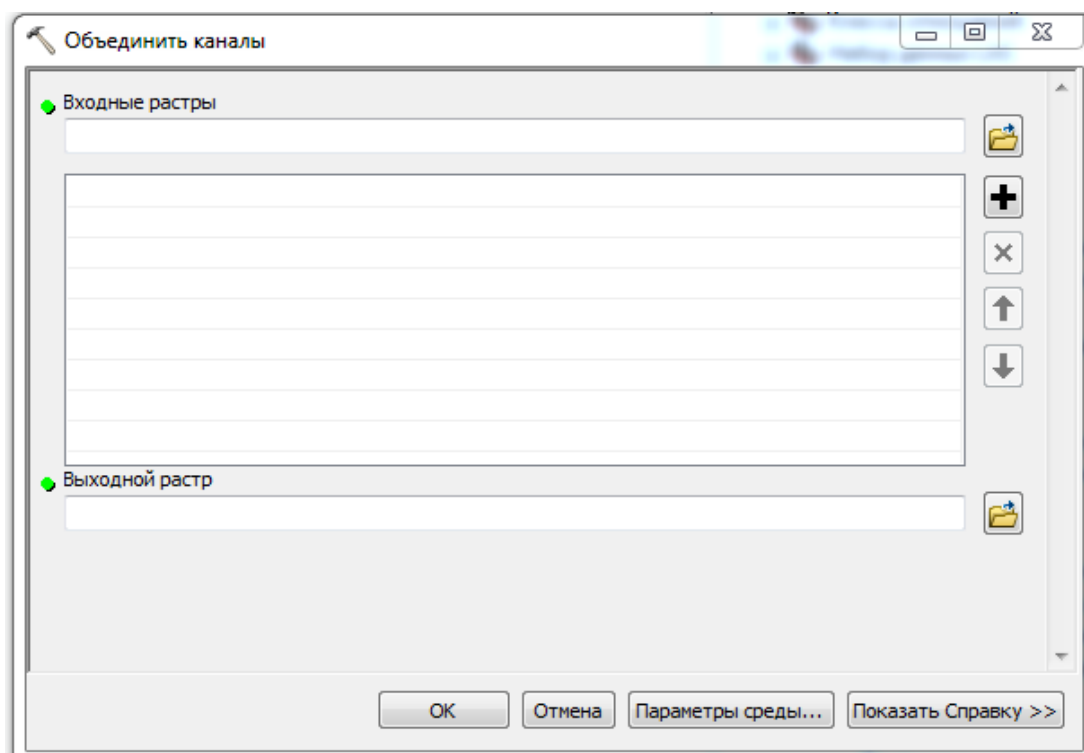


Рисунок 4.1.4 – Инструмент «Объединить каналы»

Также был использован инструмент «статистика набора каналов» для извлечения значений среднемесячных данных о АВЭМ, индекса сухости, осадков и температур, рисунок 4.1.5.

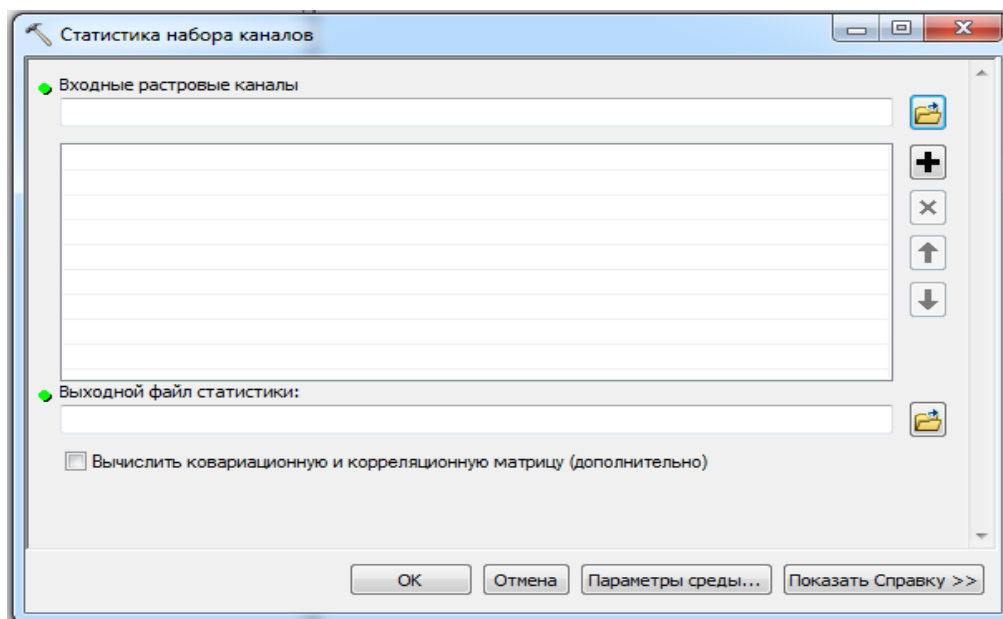


Рисунок 4.1.5 – Инструмент «Статистика набора каналов»

В дальнейшем извлеченные данные были использованы для построения и анализа графиков динамик.

4.2 Результат оценки связи динамики АВЭМ с климатическими изменениями и прогнозами на территории лесов бореальной зоны

Используя подготовленные ранее данные для расчета корреляции и модуль расчета корреляций (предоставленный лабораторией мониторинга леса, Институт леса В.Н Сукачева СО РАН), которому в качестве входных файлов указываются данные GRACE по очереди в паре с каждым климатическим параметром (индекс сухости, температура и осадки), были посчитаны следующие характеристики в виде 4 файлов в выбранном растровом формате:

- Slope (угол наклона);
- R (коэффициент корреляции между двумя рядами данных);
- Pvalue (уровень значимости);
- Intercept (смещение).

Для анализа корреляции использовались слои R и Pvalue. У данных слоя R был задан минимум/максимум -1/1 соответственно. У слоя Pvalue была проведена классификация по 2 классам значений 0 - 0,05 и 0,05 – 0,1.

На рисунке 4.2.1 представлена карта корреляции АВЭМ и осадков для Северной Америки, а на 4.2.2 - для Северной части Евразии.

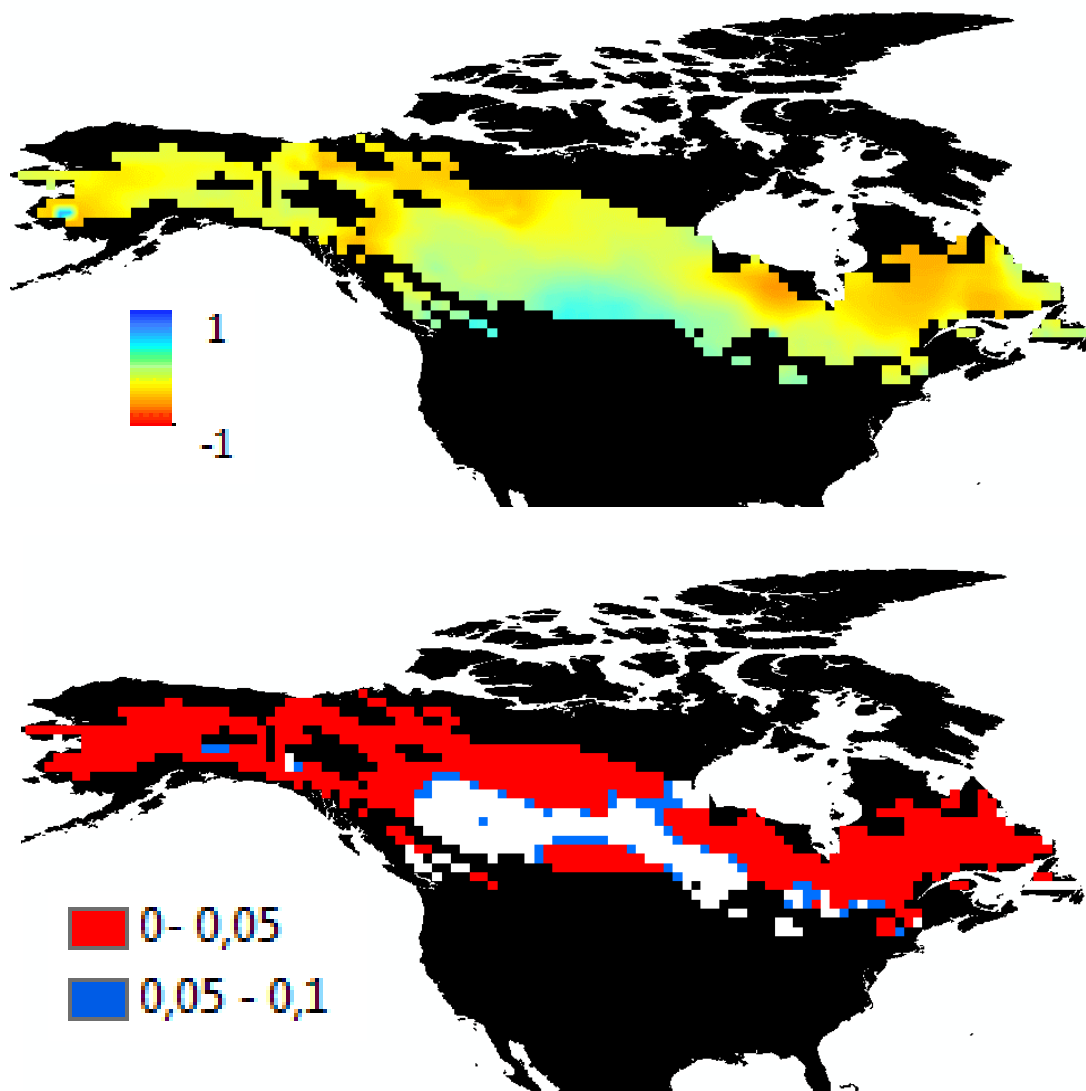


Рисунок 4.2.1 – Карта значимости и корреляции АВЭМ и осадков 2002-2015 г, Северная Америка

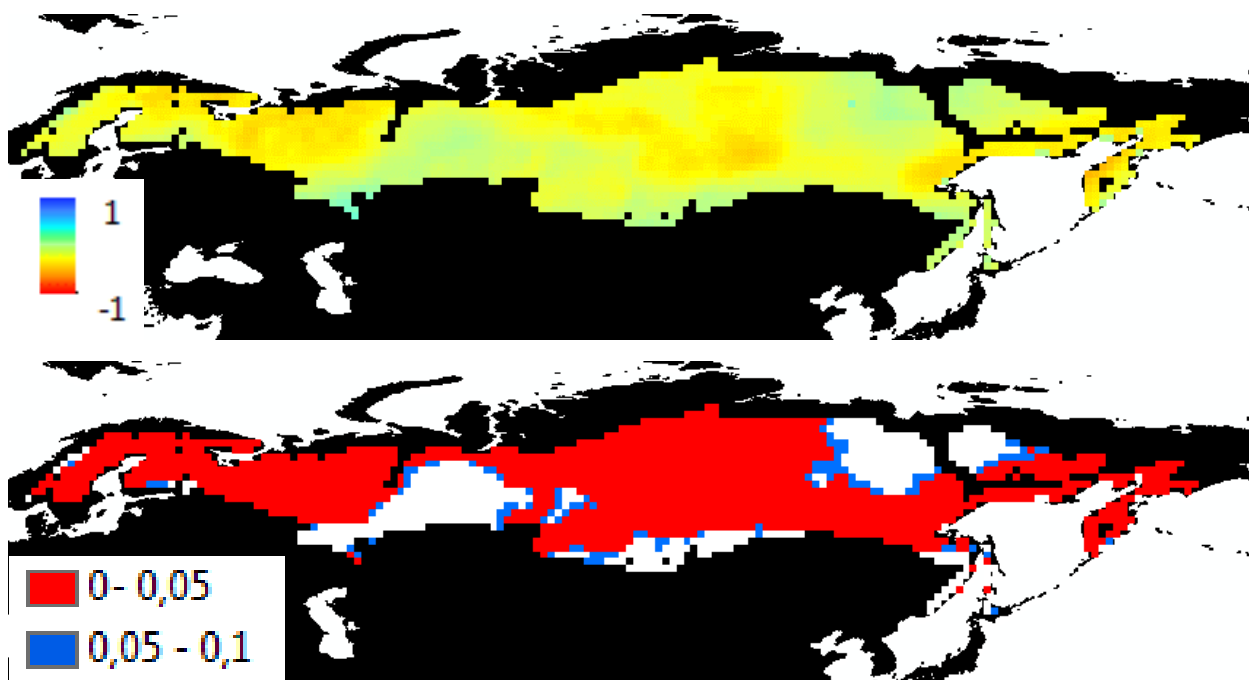


Рисунок 4.2.2 – Карта значимости и корреляции АВЭМ и осадков 2002-2015 г., северная часть Евразии

На картах корреляций видно пространственное распределение прямых и обратных корреляционных зависимостей между параметрами АВЭМ и осадками, на нижнем изображении показано, где они значимы. Если имеется значимая прямая зависимость, это означает что, чем больше дождя было на данной территории, тем больше водной массы накопилось. Есть места где имеется обратная значимая зависимость, что означает, если увеличивается количество дождей, водная массы уменьшается. Что может быть связано с местными климатическими и ландшафтными условиями. Например, на восточном побережье Северной Америки находится большая речная и озерная сеть, имеющая сток в залив и океан, поэтому водная массы при большом количестве осадков стекает или быстро испаряется. На карте корреляций Северной Евразии происходят те же процессы аналогичной предыдущей.

На рисунке 4.2.3 представлена карта корреляции АВЭМ и индекса сухости для Северной Америки, а на 4.2.4 - для Северной части Евразии.

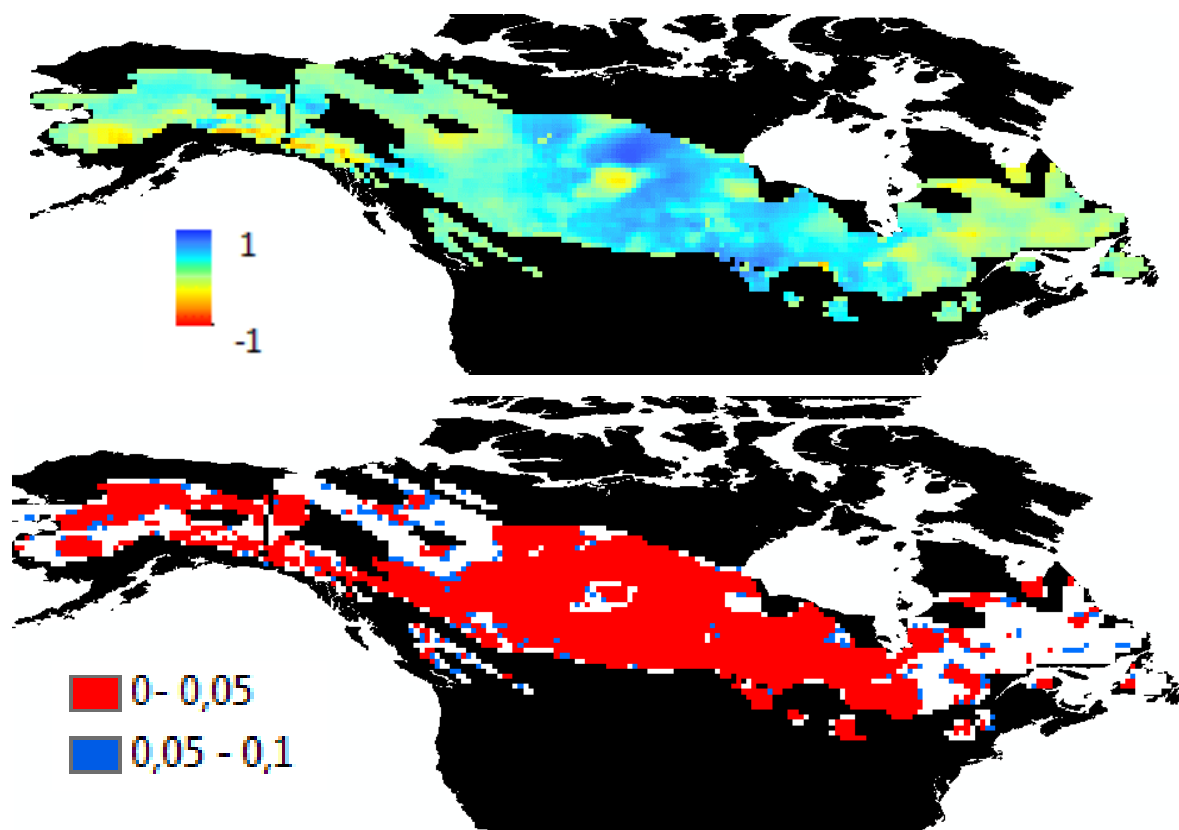


Рисунок 4.2.3 – Карта значимости и корреляции АВЭМ и индекса сухости 2002-2015 г., Северная Америка

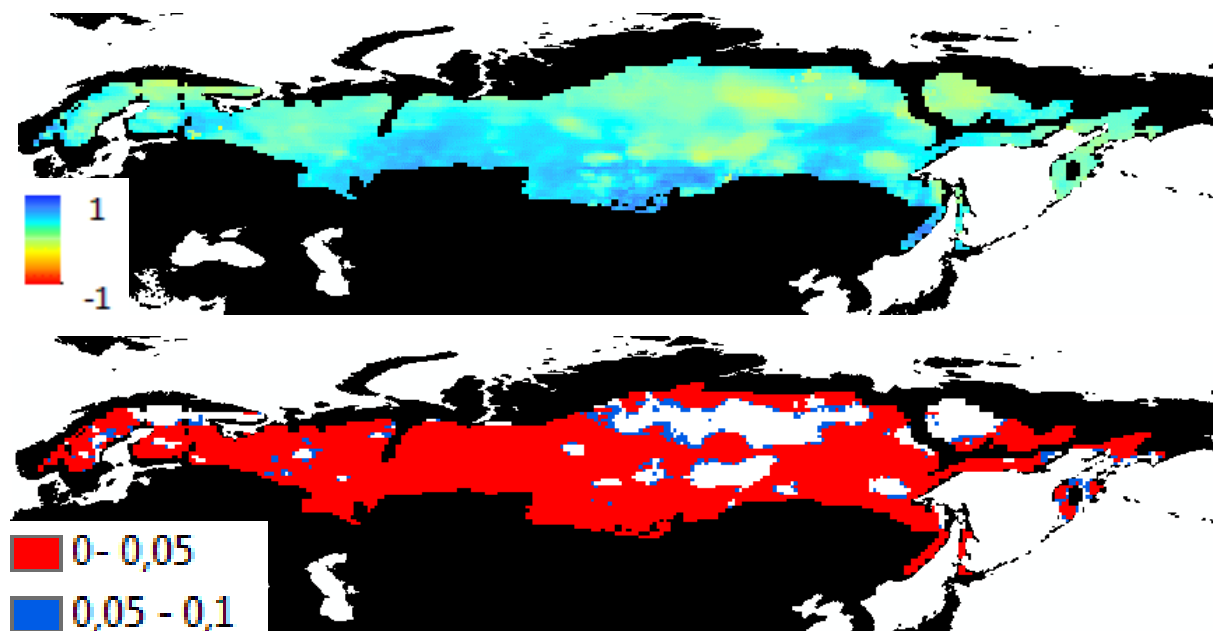


Рисунок 4.2.4 – Карта значимости и корреляции АВЭМ и индекса сухости 2002-2015 г., северная часть Евразии

На картах корреляции для Северной Америки и Северной Евразии для большей части территории наблюдается положительные корреляции, для некоторых мест это означает, что чем больше водной массы в почве, тем больше будет доступной водной массы для испарения.

На рисунке 4.2.5 представлена карта корреляции АВЭМ и температур для Северной Америки, а на 4.2.6 - для Северной части Евразии.

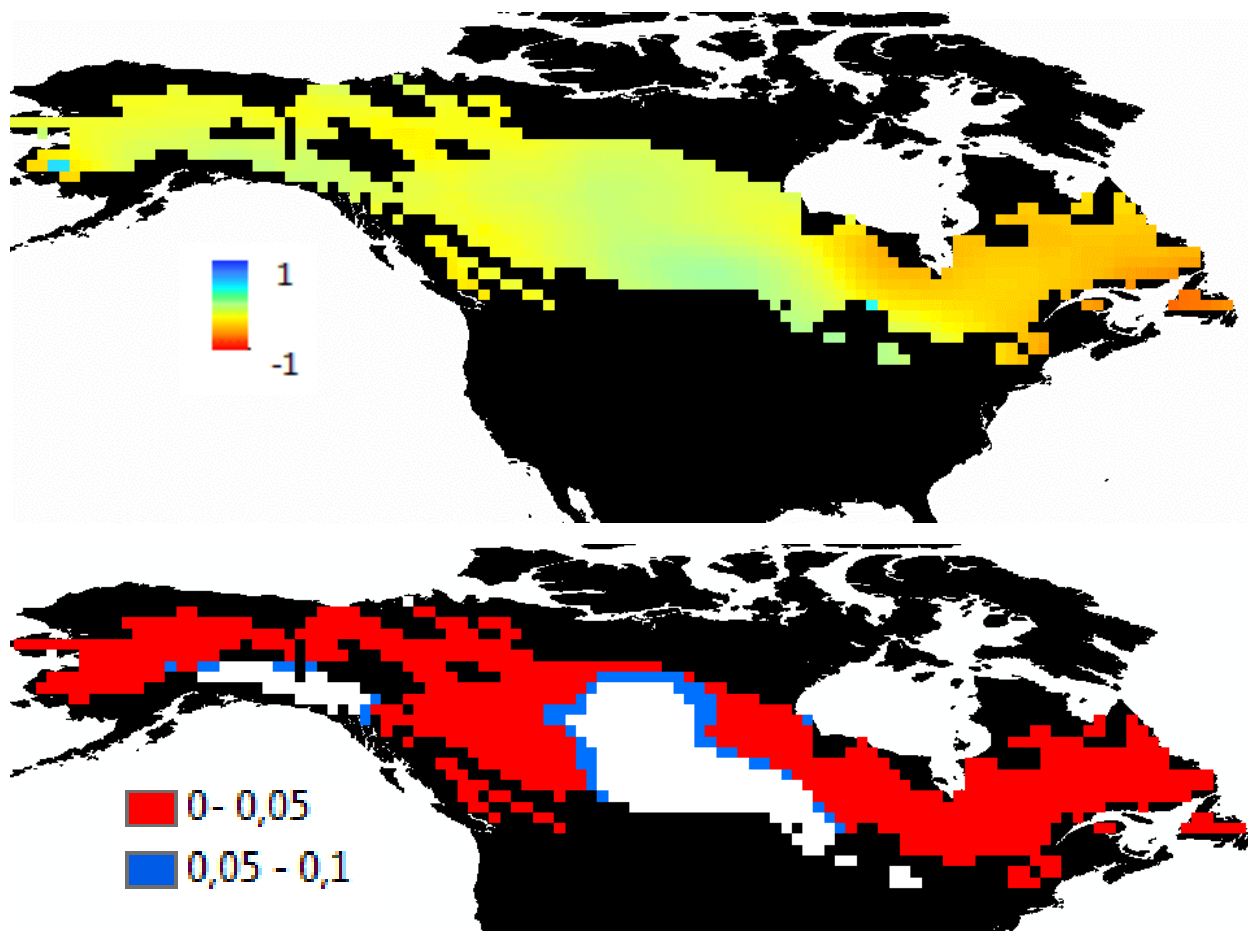


Рисунок 4.2.5 – Карта значимости и корреляции АВЭМ и температур 2002-2015 г., Северная Америка

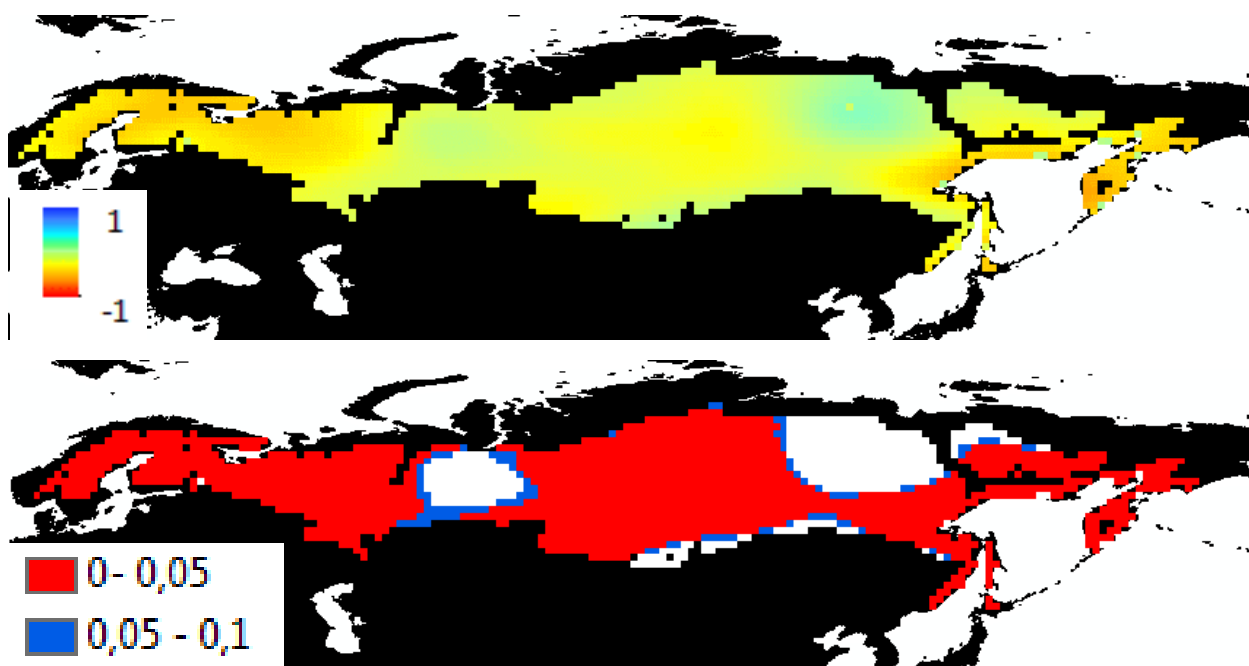


Рисунок 4.2.6 – Карта значимости и корреляции АВЭМ и температур 2002-2015 г., северная часть Евразии

На карте корреляции Северной Америки и Северной части Евразии, для АВЭМ и температур для большей части территории наблюдается убывающая корреляция, для некоторых мест это означает, что чем больше температура, тем меньше АВЭМ. Из этого следует, что АВЭМ стекает через водную сеть или испаряется.

Используя подготовленные ранее данные для расчета трендов и модуль расчета трендов (предоставленный лабораторией мониторинга леса, Институт леса В.Н Сукачева СО РАН), которому в качестве входного файла указываться отдельно каждые данные АВЭМ, индекса сухости, температур и осадков, определены параметры в 4 файлах в выбранном растровом формате:

- Slope (угол наклона);
- R (коэффициент корреляции между двумя рядами данных);
- Pvalue (уровень значимости);
- Intercept (смещение).

Для анализа трендов использовались слои Slope и Pvalue. У данных слоя Slope был задан минимум/максимум -1/1 соответственно. У слоя Pvalue была проведена классификация по 2 классам значений 0 - 0,05 и 0,05 – 0,1.

На рисунке 4.2.7 представлена карта трендов АВЭМ для Северной Америки.

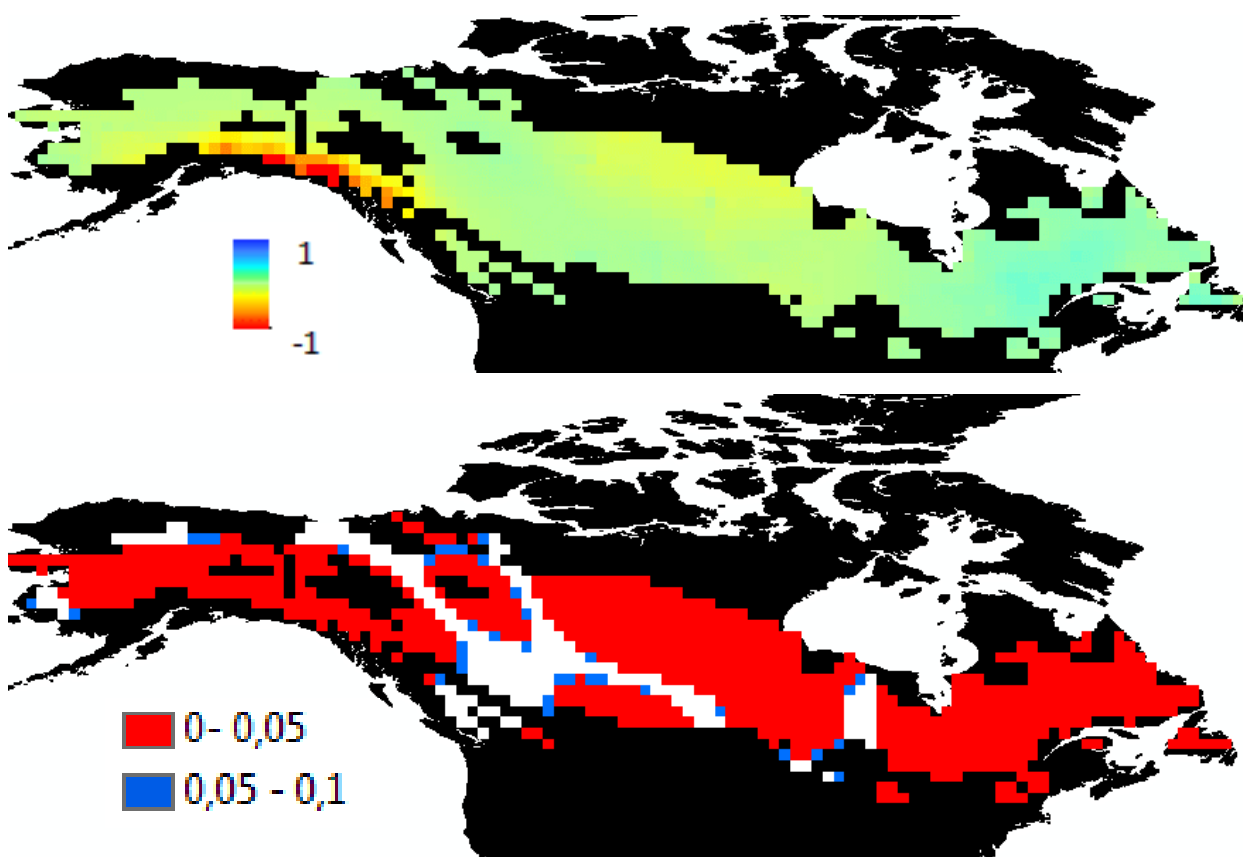


Рисунок 4.2.7 – Карта значимости и трендов АВЭМ 2002-2015 г., Северная Америка

На карте трендов АВЭМ, выделили 3 зоны интереса, для которых в дальнейшем были построены графики динамик АВЭМ. Полученный результат изображен на рисунке 4.2.8.

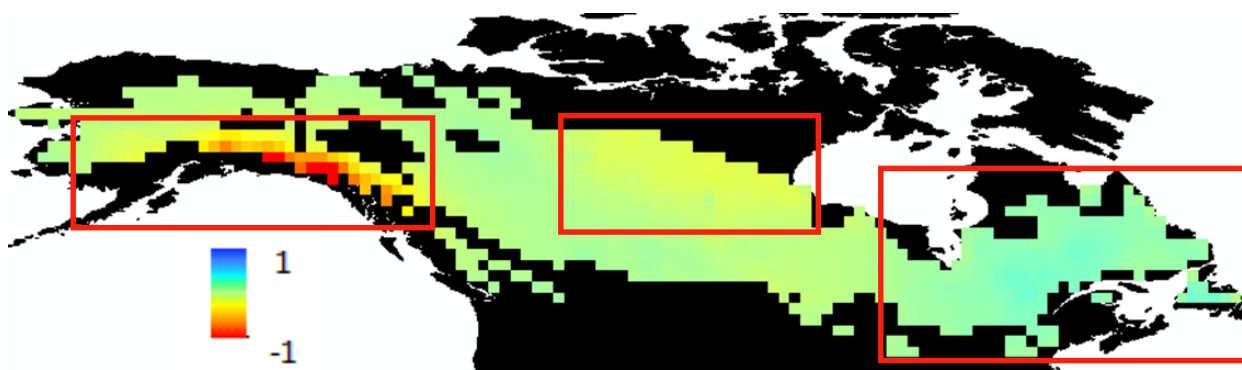


Рисунок 4.2.8 – Карта трендов зон интереса АВЭМ 2002-2015 г., Северная Америка

Нумерация зон по карте идет слева направо (зона 1, 2, 3), далее построили график динамики для каждой трех зон, рисунок 4.2.9.

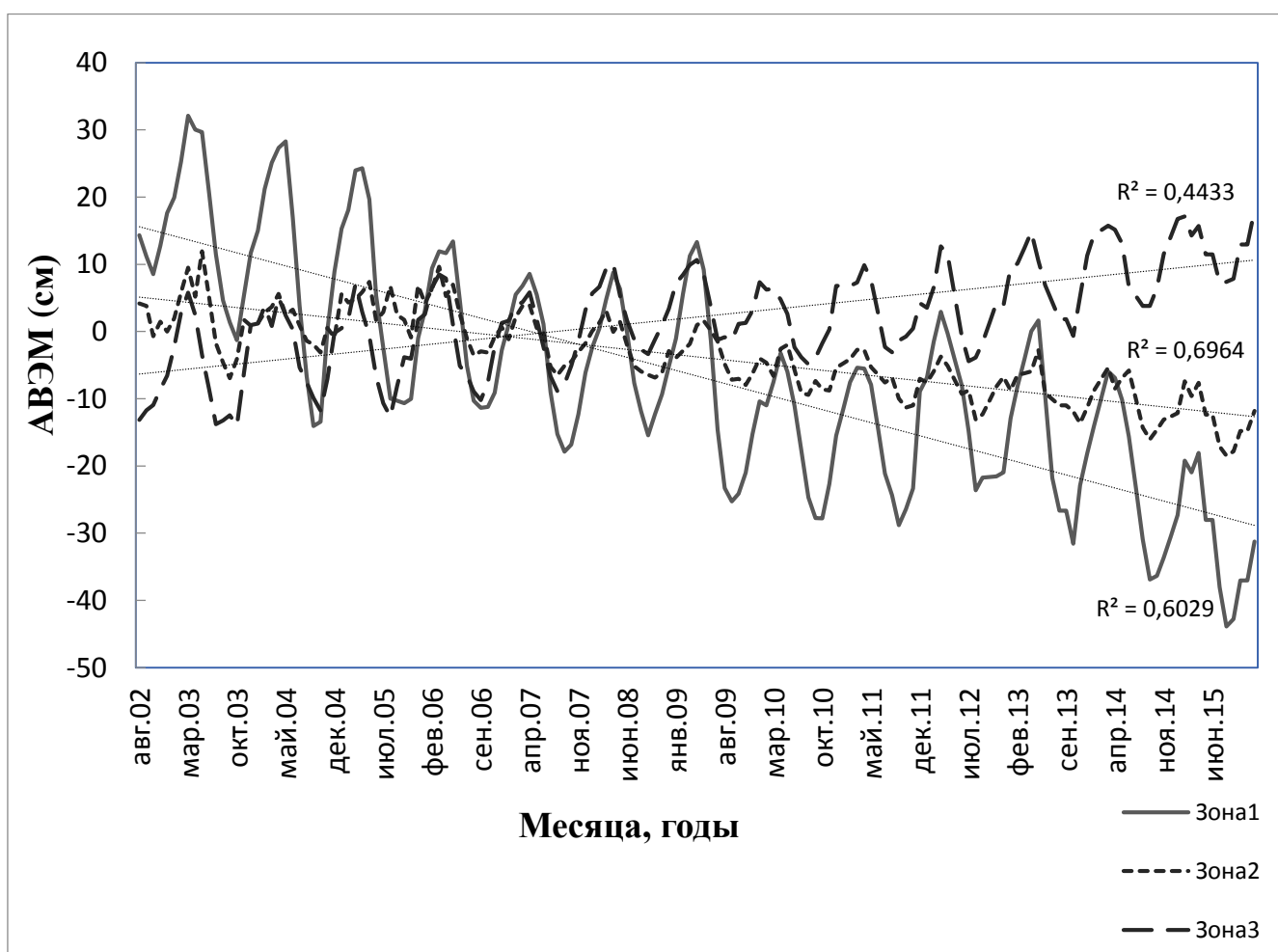


Рисунок 4.2.9 – График динамики для трех зон интереса 2002-2015 г., Северная Америка

На графике динамики видно, что для зон 1 и 2 имеются значимые убывающие тренды, а зона 3 имеет возрастающий тренд (для всех трех зон $p = 0$).

На рисунке 4.2.10 представлена карта трендов АВЭМ для Северной части Евразии.

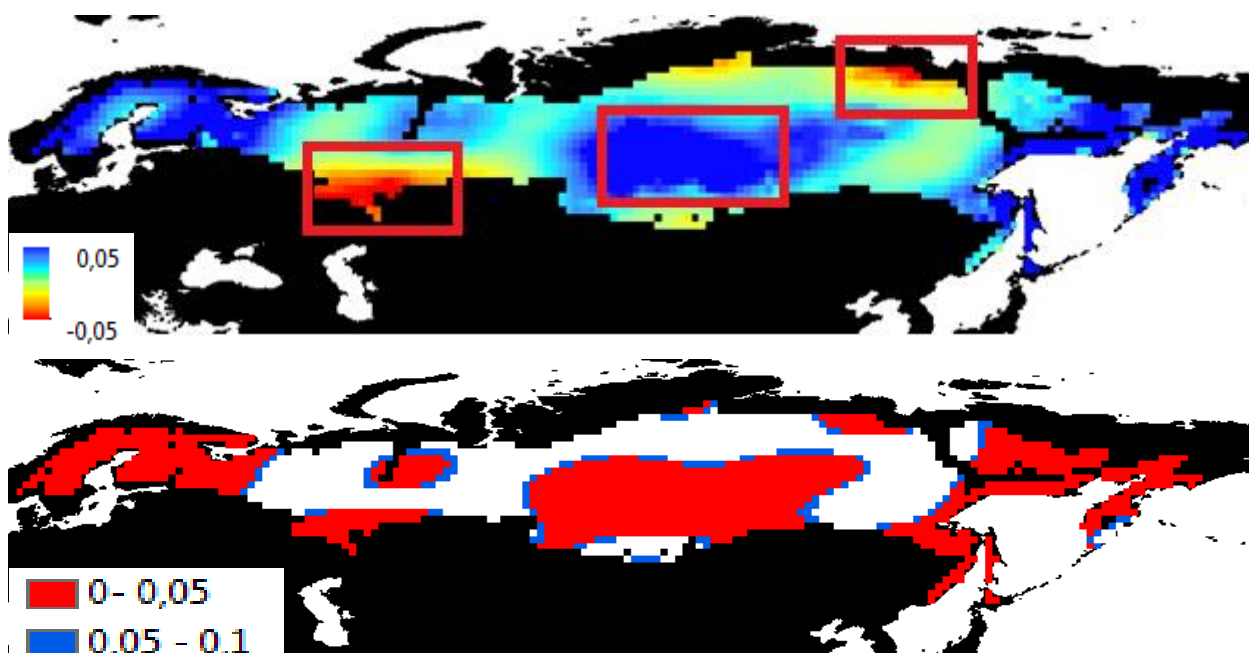


Рисунок 4.2.10 – Карта значимости и трендов АВЭМ 2002-2015 г., северная часть Евразии

На рисунке 4.2.11 представлена карта прогноза изменения влажности почвы.

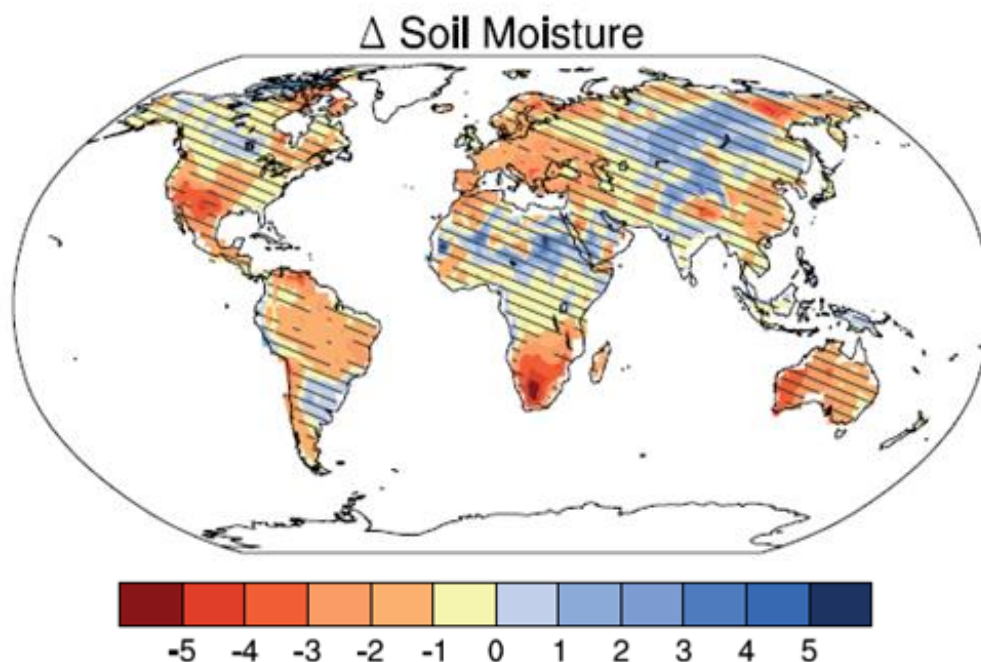


Рисунок 4.2.11– Карта влажности почвы, прогноз изменения влажности почвы, глобальная карта

Используя карту, рисунок (4.2.11) из статьи [19] провели сравнительный анализ с картой трендов АВЭМ для Северной части Евразии, рисунок (4.2.10), где выделили три зоны совпадения значений, и из этого следует, в дальнейшем в зонах для убывающих трендов ситуация ухудшиться, в зоне где тренд возрастающий ситуация останется стабильной.

На карты трендов Северной Америки, видно, что присутствуют высокие значения трендов, тренды значимые. А на карте трендов России низкое значение трендов, при пороговых значениях 1 и -1 динамику трендов не видно, выставлены пороговые значения 0,05 и -0,05.

На рисунке 4.2.12 представлена карта трендов индекса сухости для Северной Америки.

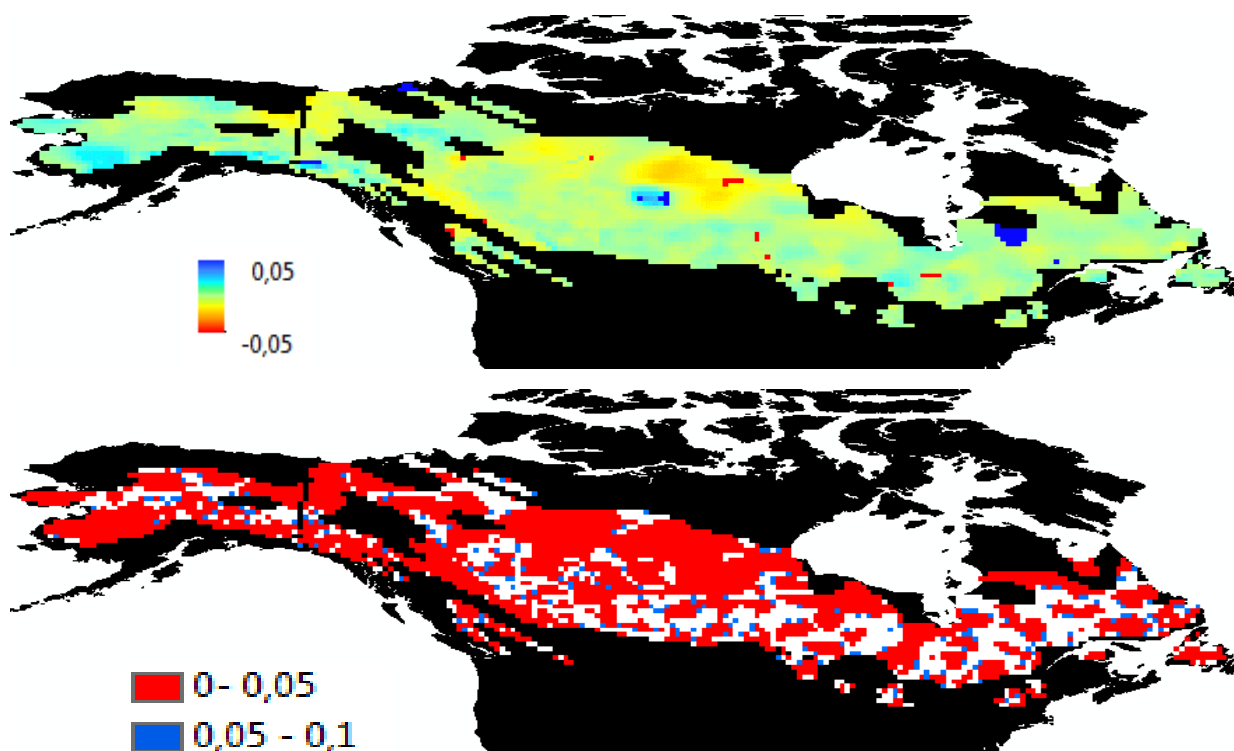


Рисунок 4.2.12 – Карта значимости и трендов индекса сухости 2002-2015 г., Северная Америка

На рисунке 4.2.13 представлена карта трендов индекса сухости для Северной части Евразии.

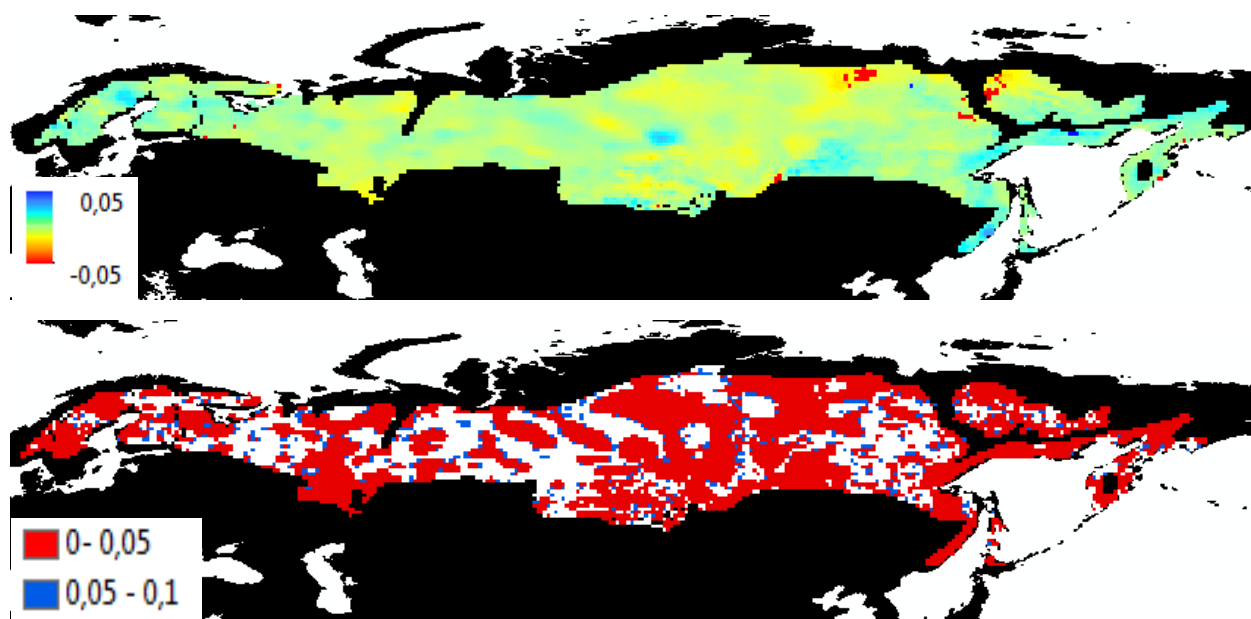


Рисунок 4.2.13 – Карта значимости и трендов индекса сухости 2002-2015 г., северная часть Евразии

Карты трендов температур и осадков для Северной Америки и северной части Евразии не значимые, поэтому результаты не рассматриваем.

Построили тренды по летним месяцам (июнь-август) для периода с 2002 по 2015 год, так как интересуется связь АВЭМ и бореальных лесов для которых вегетационный период на северных территориях достаточно короткий и попадает преимущественно на летний месяц. На рисунке 4.2.14 представлена карта трендов летних месяцев для Северной Америки.

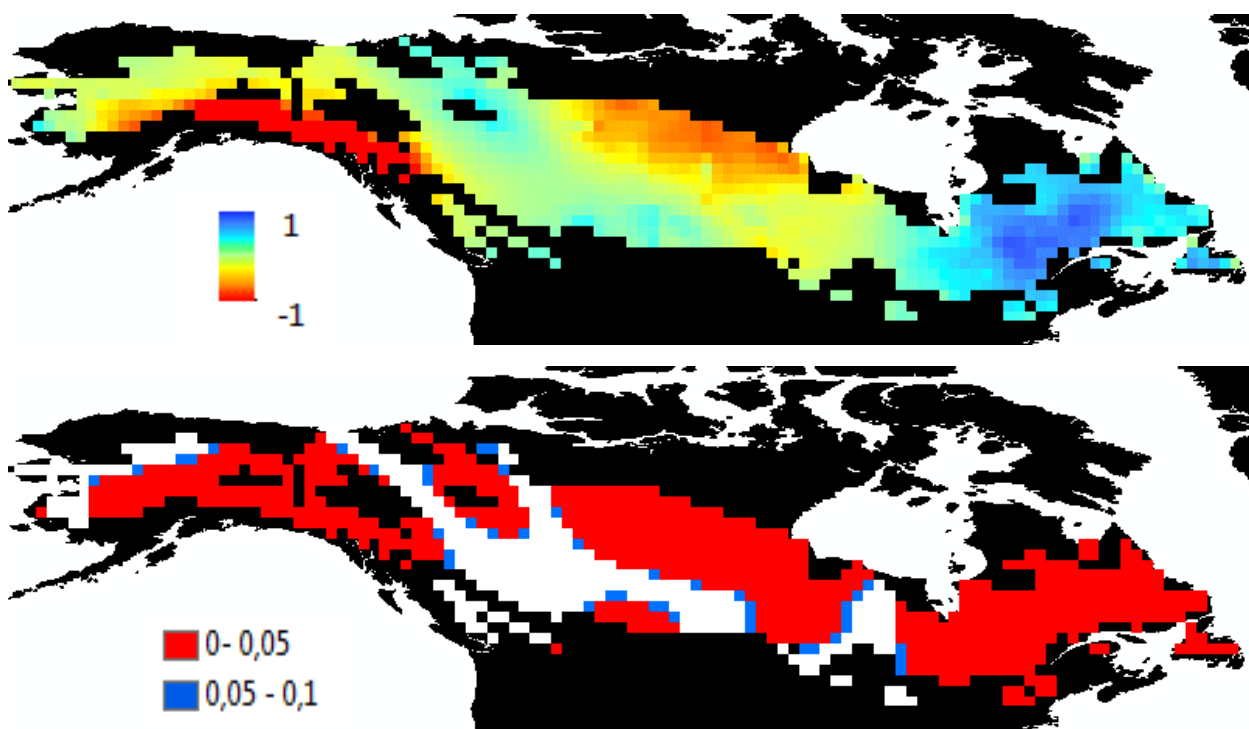


Рисунок 4.2.14 – Карта значимости и трендов для летних месяцев 2002-2015 г., Северная Америка

На рисунке 4.2.15 представлена карта трендов летних месяцев для северной части Евразии.

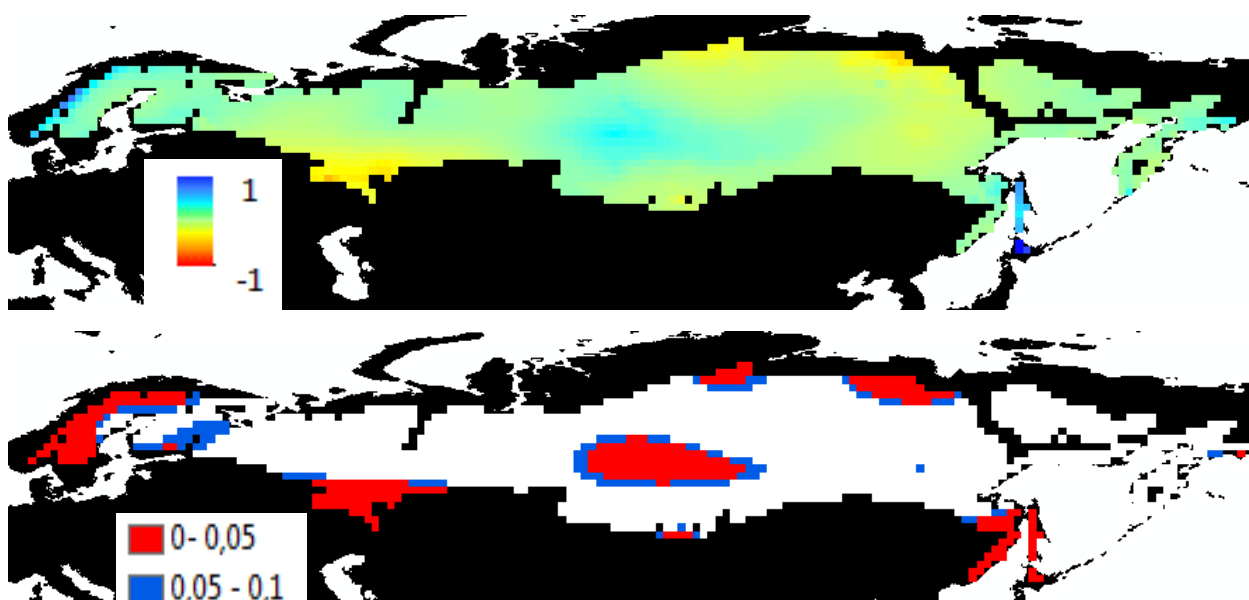


Рисунок 4.2.15 – Карта значимости и трендов для летних месяцев 2002-2015 г., северная часть Евразии

По сравнению с зонами, отмеченными на картах трендов за весь год, зоны, отмеченные на картах летних трендов пространственно, остались там же, и стали более ярко выражены, что свидетельствует о том, что вклад в трендах за весь год преимущественно из-за летних месяцев.

Далее с помощью программной среды ArcGIS экспортировали среднемесячные данные динамики водной массы, индекса сухости, температур, осадков и, используя только данные летних месяцев июнь, июль, август с 2002 по 2015 год построили график динамики водной массы, индекса сухости, температур и осадков с 2002 по 2015 год для Северной Америки и Северной части Евразии рисунок, 4.2.16 и 4.2.17.

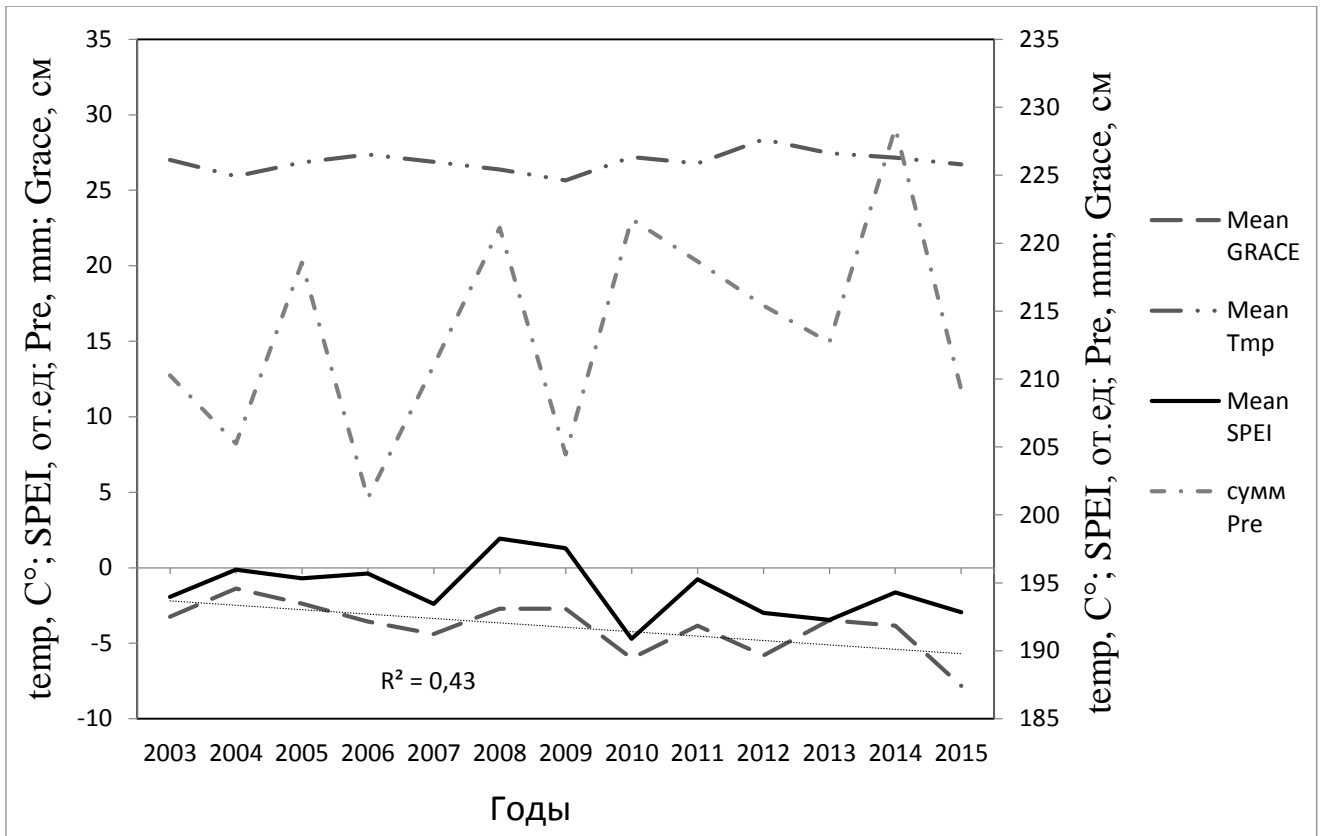


Рисунок 4.2.16 – График среднелетней динамики водной массы, индекса сухости, температуры и осадков с 2002 по 2015 г., Северная Америка. Коэффициенты масштабирования для графиков: водной массы и осадков: 1, температура: 2, SPEI: 7

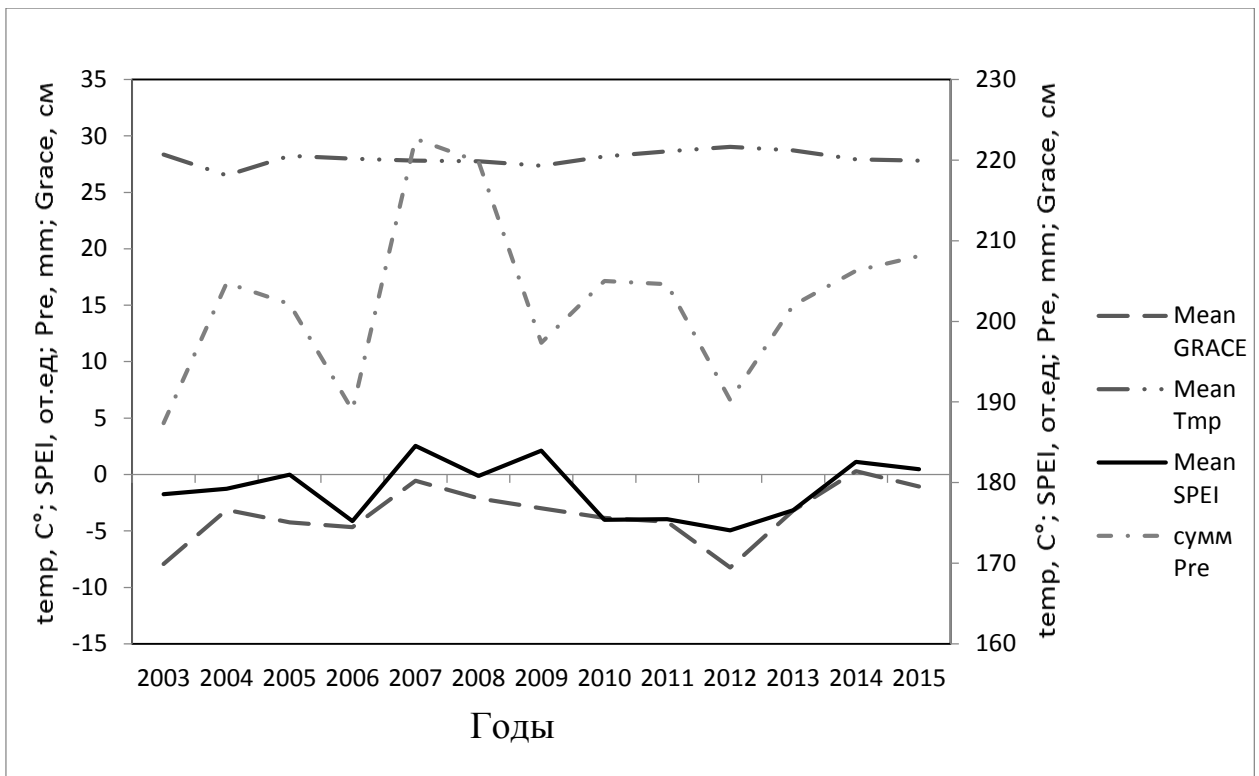


Рисунок 4.2.17 – График динамики водной массы, индекса сухости, температуры и осадков с 2002 по 2015 г., северная часть Евразии.

Коэффициенты масштабирования для графиков: водной массы и осадков: 1, температура: 2, SPEI: 7

По графику рисунок 4.2.16 и 4.2.17 определили самые засушливые года по динамике индекса сухости и АВЭМ для Северной Америки: 2003, 2007, 2010 и 2015. Для северной части Евразии: 2003, 2006, 2012 и 2015.

Далее были построены года минимумов АВЭМ и индекса сухости для Северной части Евразии и Северной Америки, на рисунке, 4.2.18, 4.2.19, 4.2.20, 4.2.21 представлены карты для Северной Америки и на рисунке, 4.2.22, 4.2.23, 4.2.24, 4.2. 25 представлены карты для Северной части Евразии.

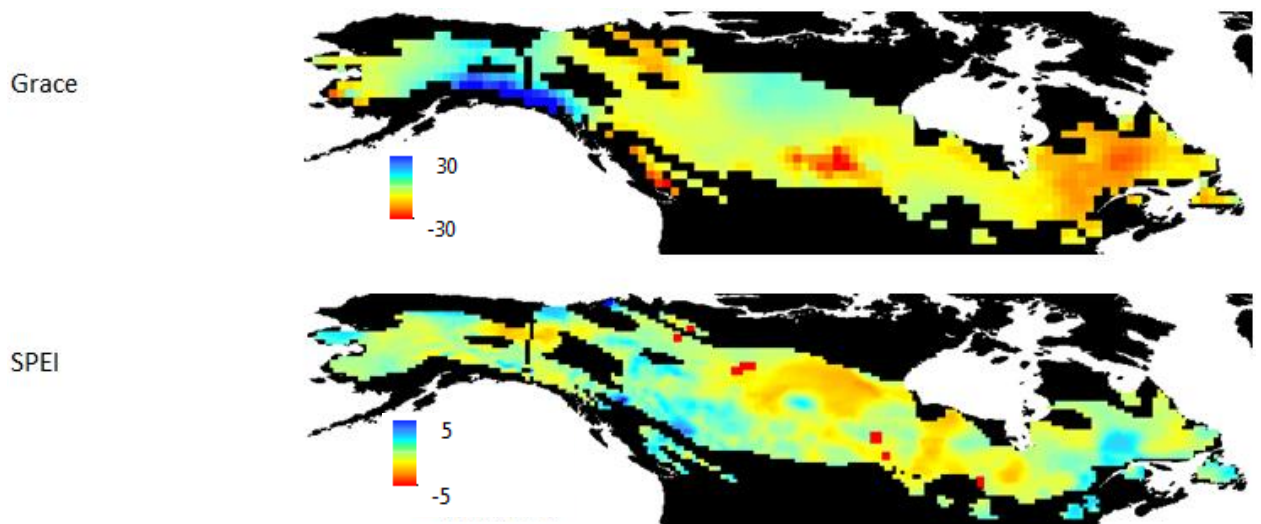


Рисунок 4.2.18 – Года минимумов АВЭМ и индекса сухости 2003 г.,
Северная Америка

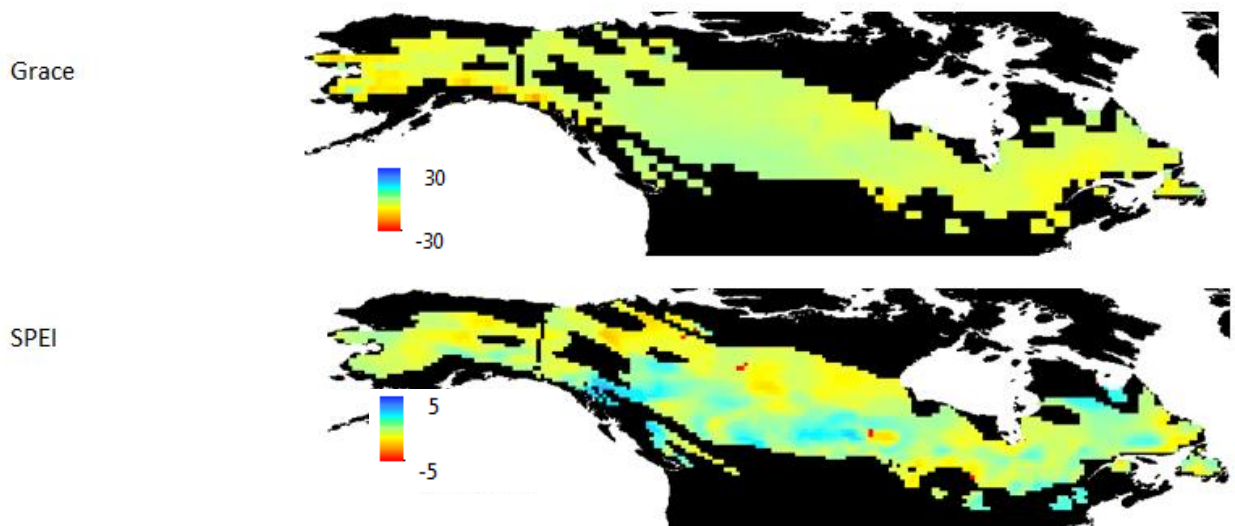


Рисунок 4.2.19 – Года минимумов АВЭМ и индекса сухости 2007 г.,
Северная Америка

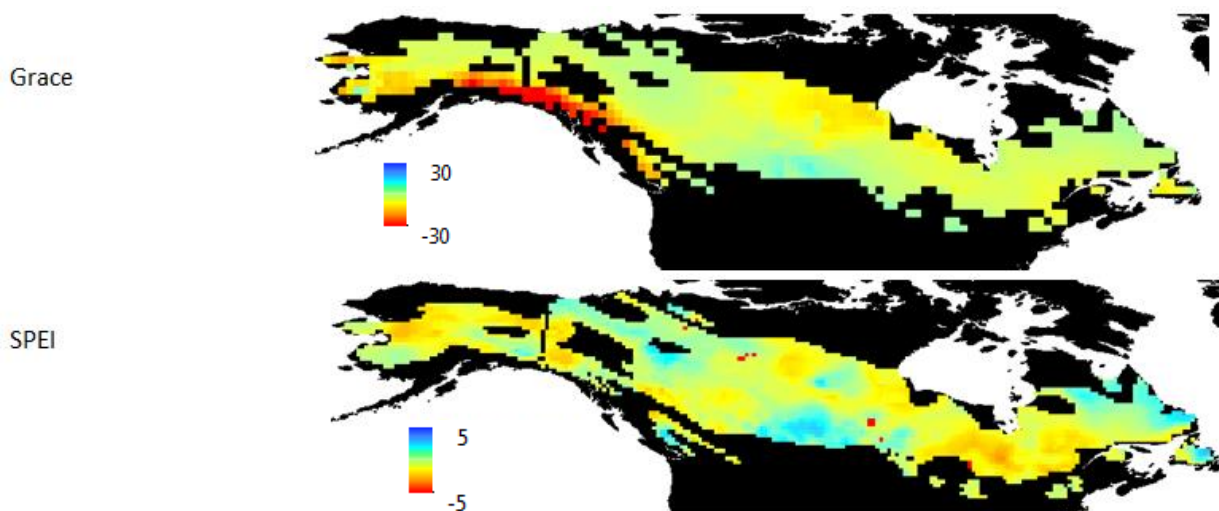


Рисунок 4.2.20 – Года минимумов АВЭМ и индекса сухости 2010 г.,
Северная Америка

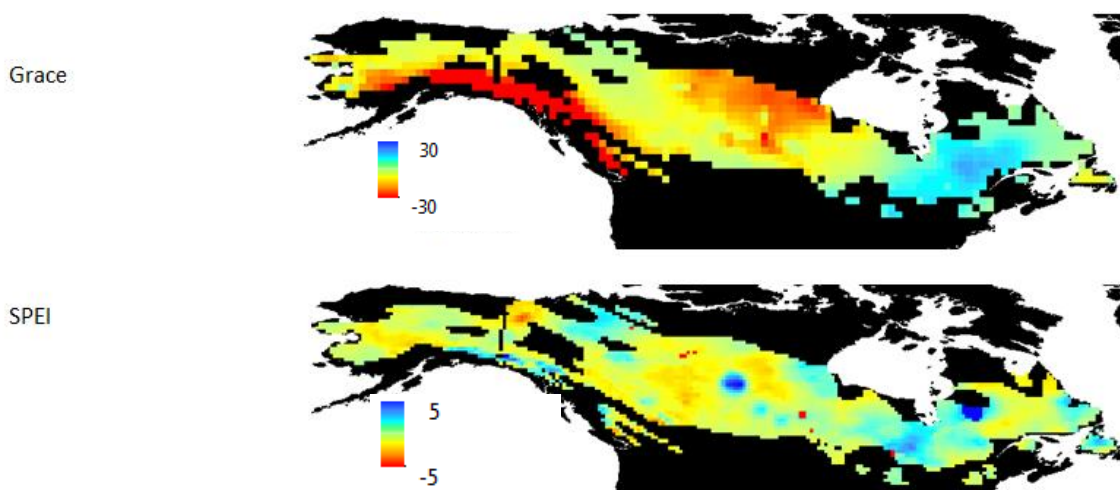


Рисунок 4.2.21 – Года минимумов АВЭМ и индекса сухости 2015 г.,
Северная Америка

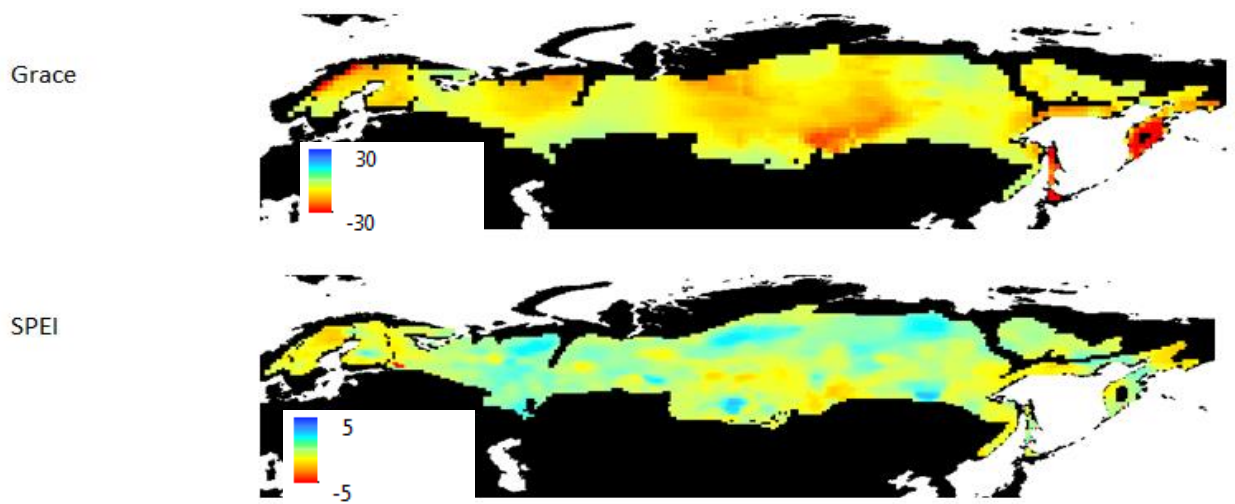


Рисунок 4.2.22 – Года минимумов АВЭМ и индекса сухости 2003 г., северная часть Евразии

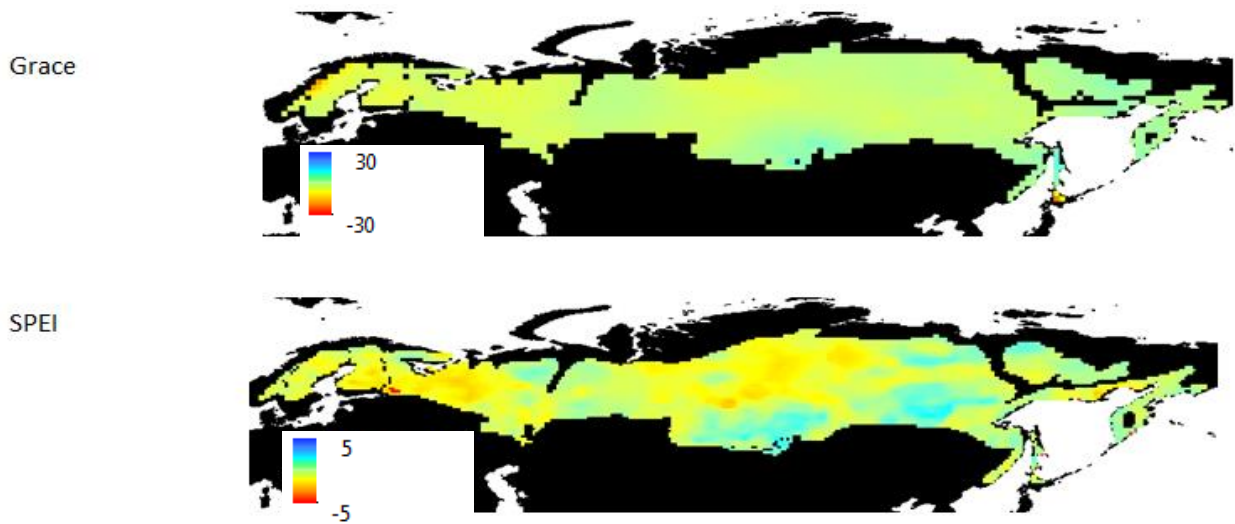


Рисунок 4.2.23 – Года минимумов АВЭМ и индекса сухости 2006 г., северная часть Евразии

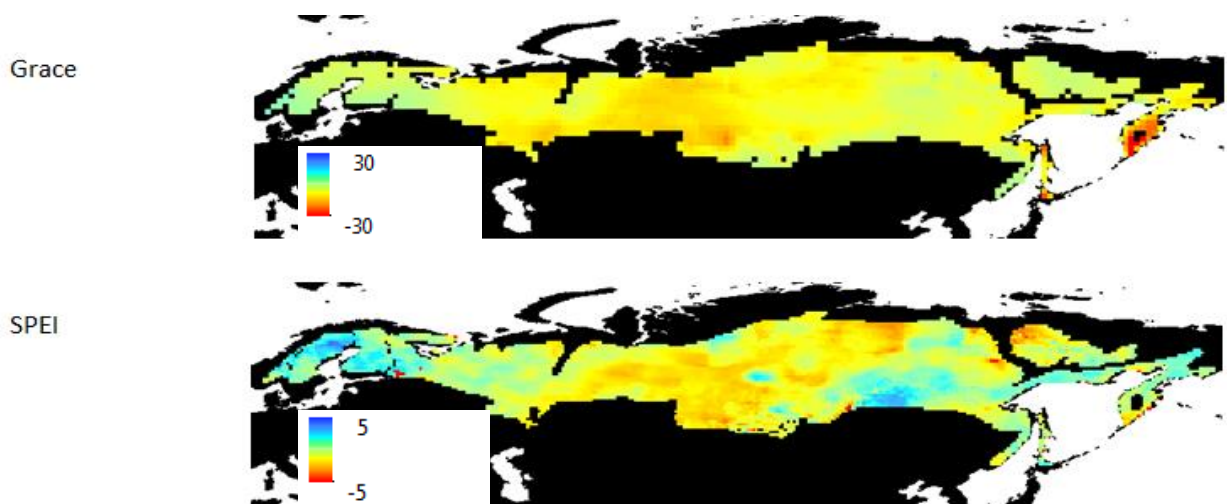


Рисунок 4.2.24 – Года минимумов АВЭМ и индекса сухости 2012 г., северная часть Евразии

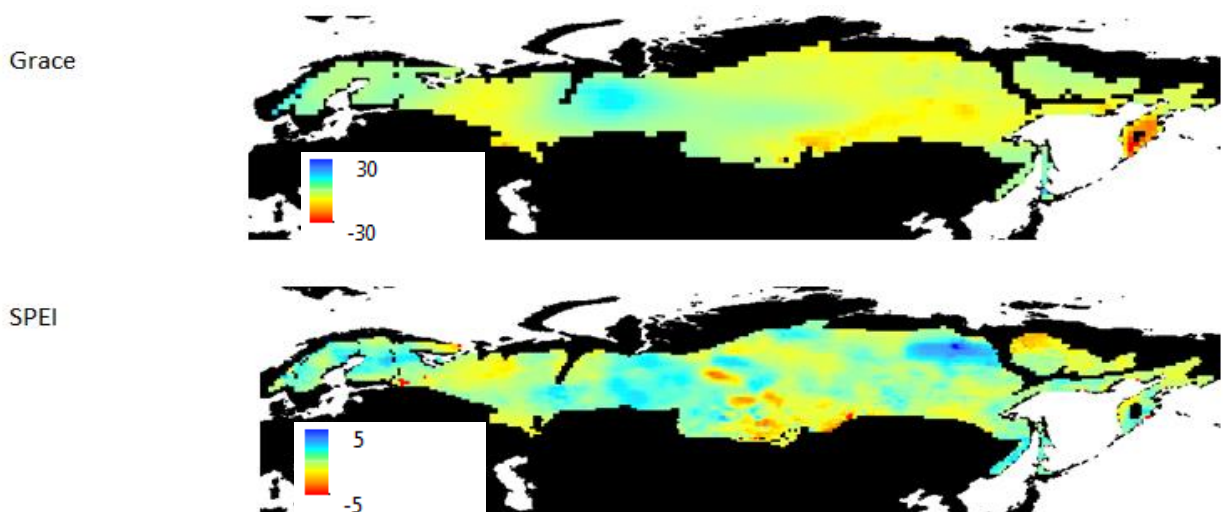


Рисунок 4.2.25 – Года минимумов АВЭМ и индекса сухости 2015 г., северная часть Евразии

Анализируя самые засушливые года Северной Америки следует обратить внимание на западную часть, на карте 2003 года в западной части уровень АВЭМ высокий, что нормально для этой территории, но в 2010 и 2015 году уровень АВЭМ очень низкий, были также построены карты минимумов для каждого года с 2003 по 2015, проанализировав карты, получил следующие результаты начиная с 2008 года по 2015 площадь засухи с низким показателем АВЭМ каждый год увеличивалась. Анализируя карты

засух северной части Евразии можно сделать вывод, что существует зависимость между АВЭМ и индексом сухости наиболее заметны на картах 2006, 2012 и 2015 года.

На рисунке 4.2.26 представлен график динамики, а на рисунке 4.2.27 карта суммарного вклада годов минимумов АВЭМ, для территории Северной Америки.

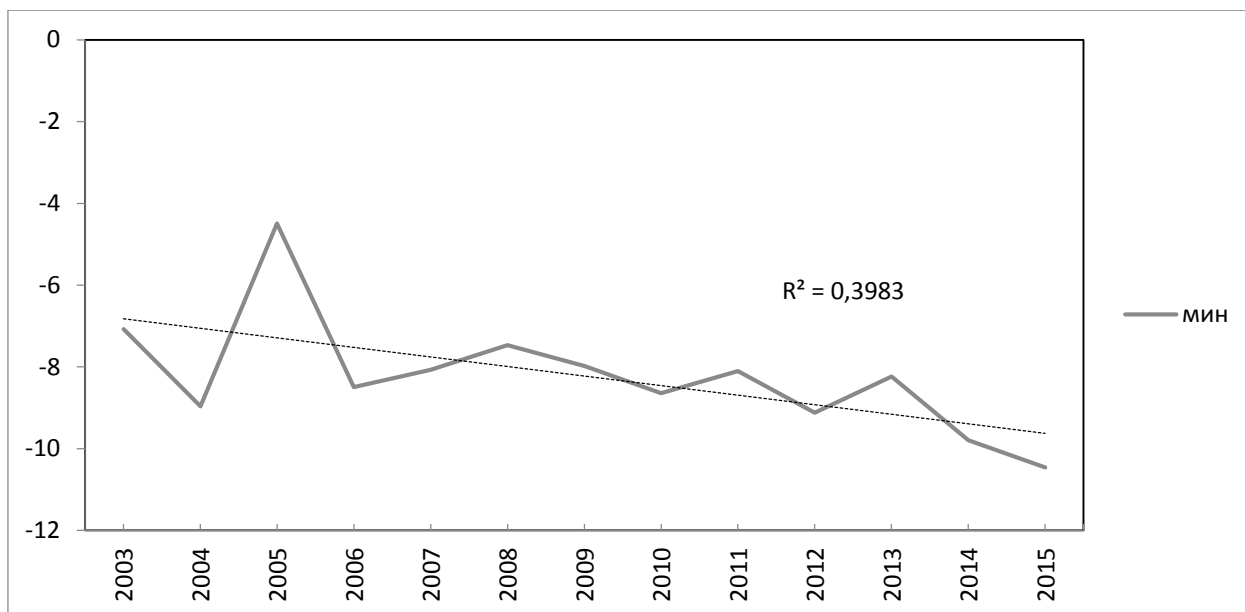


Рисунок 4.2.26 – График динамики минимумов годов с 2002 по 2015 г., Северная Америка

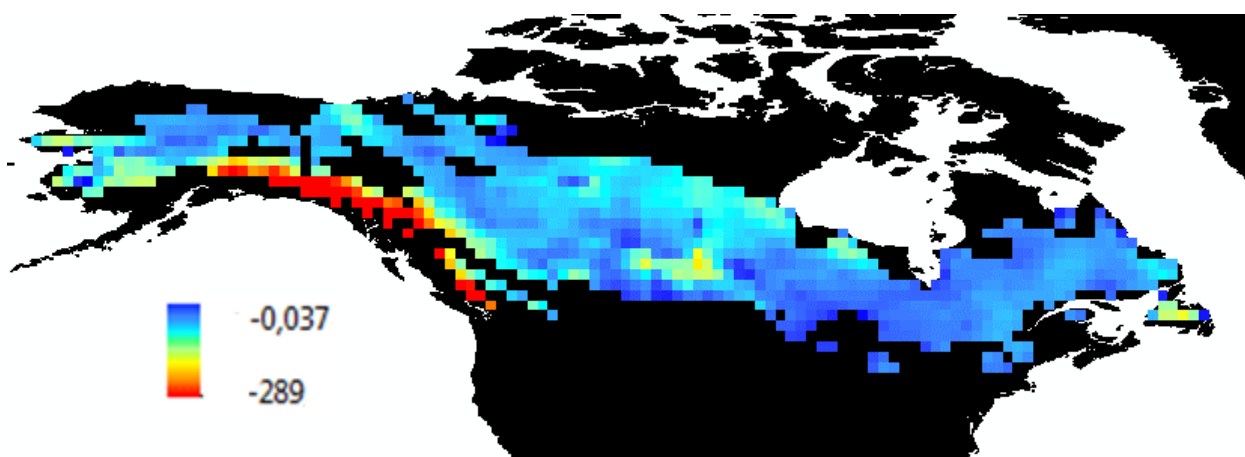


Рисунок 4.2.27 – Карта суммарного вклада годов минимумов АВЭМ за 2004, 2012, 2015 годы, Северная Америка

На рисунке 4.2.28 представлена карта прогноза изменения влажности почвы.

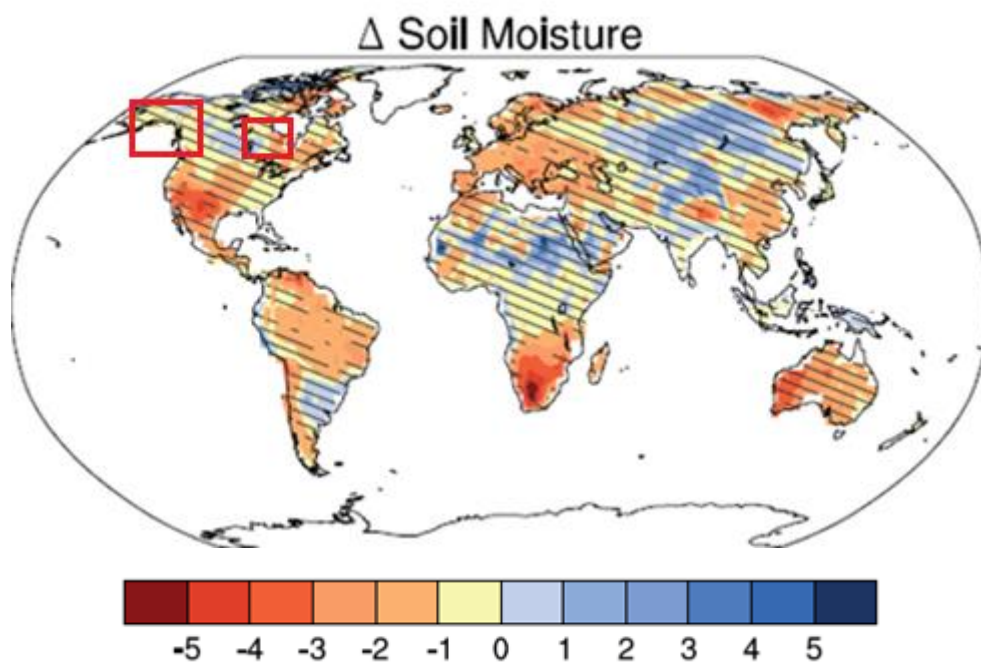


Рисунок 4.2.28 – Карта влажности почвы, прогноз изменения влажности почвы, глобальная карта

Сопоставляя карту Soil Moisture статья [19], с картой рисунок (4.2.27) можно увидеть, что выделенные зоны засухи на карте Soil Moisture совпадут с зонами засухи карты суммарного вклада годов минимумов АВЭМ рисунок (4.2.27).

На рисунке 4.2.28 представлен график динамики, а на рисунке 4.2.29 карта суммарного вклада годов минимумов АВЭМ, для территории северной части Евразии.



Рисунок 4.2.28 – График динамики минимумов годов с 2002 по 2015 г. для северной части Евразии

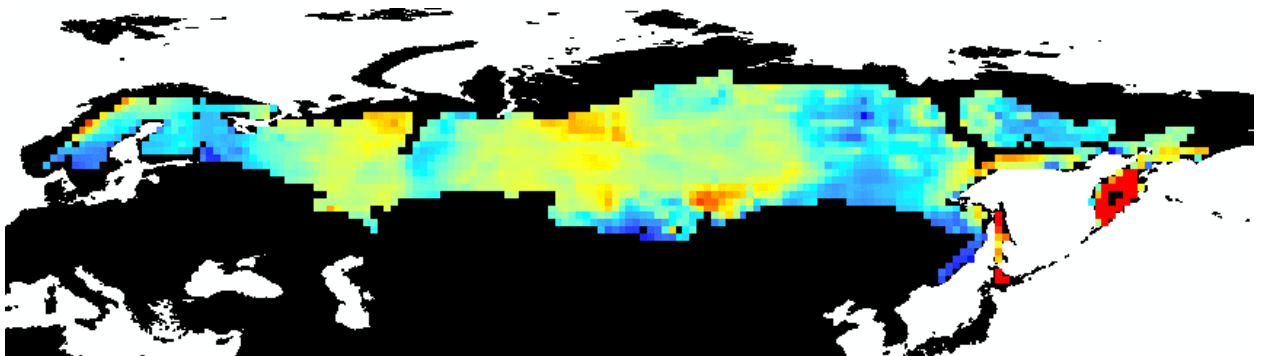


Рисунок 4.2.29 – Карта суммарного вклада годов минимумов АВЭМ за 2003, 2012 годы, северная части Евразии

По среднелетним данным для территорий посчитали значимость трендов, для Северной Америки ($p = 0.02$), северной части Евразии ($p = 0.82$). Далее построили график динамики годов минимумов для Северной Америки, где выявили года минимумов для данной территории 2004, 2012, 2015. И для северной части Евразии 2003 и 2012 годы. Опираясь этими данными, построили карту суммарного вклада годов минимумов АВЭМ для двух территории.

В данной статье [20] автор рассказывает о некоторых территориях, которые выделены на картах суммарного вклада минимумов АВЭМ, Северная Америка рисунок (4.2.27) и северная часть Евразии рисунок (4.2.29). В европейской части России наибольшую тревогу вызывает усыхание ельников. Так, наиболее привлекая к себе внимание и, вероятно, наиболее обширным по площади в России является массовое усыхание лесов в Архангельской обл., наблюдаемое с 1997 года. Усыхание имеет интенсивную динамику развития: с начала 2004 г. к концу 2005 г. Площадь усыхания увеличилась примерно на 50% и оценивается сегодня более чем в 2 млн. га. При этом процесс поражения уже перекинулся и на Удорский район Республики Коми. Ожидается, что общая площадь усыхающих лесов может достигнуть 5 млн. га [20].

За последние 20 лет в Российской Федерации ежегодно усыхает в среднем около 300 тыс. га лесных насаждений. Динамика гибели лесов имеет определенную цикличность, связанную с периодичностью влияния на леса комплекса отрицательных факторов, но при этом рост площадей усохших насаждений имеет стабильный характер. По официальным данным, только в 2003 г. площадь погибших лесов составила 551,3 тыс. га, что в 1,6 раза больше, чем в 2002 г. и на 66% больше средних данных за последние 10 лет. Большая часть этих древостоев (88%) находится в Сибири и на Дальнем Востоке и представлена преимущественно хвойными лесами [20].

Процесс усыхания бореальных лесов в Северной Америке также распространен на огромных территориях. «The State» — официальный информационный портал штата Южная Каролина (США) — сообщает о развитии усыхания сосновых лесов западного побережья Канады. Статья называется «Rapid warming» spreads havoc in Canada's forests — «Быстрое потепление сеет разруху в лесах Канады»: речь идет о массовом усыхании сосновых лесов, связанном с небывалой вспышкой численности дендроктона *Dendroctonus ponderosae* Hopkins. Последние обследования показали, что площадь усыхающих лесов уже достигла 8,5 млн. га [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были построены карты корреляции АВЭМ и осадков для Северной Америки и Северной части Евразии, на картах корреляций видно пространственное распределение прямых и обратных корреляционных зависимостей между параметрами АВЭМ и осадками. Если имеется значимая прямая зависимость, это означает что, чем больше дождя было на данной территории, тем больше водной массы накопилось. Есть места, где имеется обратная значимая зависимость, что означает, если увеличивается количество дождей, водная массы уменьшается, что может быть связано с местными климатическими и ландшафтными условиями. Построены карты корреляции АВЭМ и индекса сухости для большей части территории наблюдается положительные корреляции, для некоторых мест это означает, что чем больше водной массы в почве, тем больше будет доступной водной массы для испарения. Построены карты корреляции АВЭМ и температур для большей части территории наблюдается убывающая корреляция, для некоторых мест это означает, что чем больше температура, тем меньше АВЭМ. Из этого следует, что АВЭМ стекает через водную сеть или испаряется.

Построены карты трендов АВЭМ для Северной Америки, выделились три зоны интереса, для этих зон был построен график динамик, на западе и центральной части Северной Америки наблюдается убывающие тренды, в восточной части наблюдается значимый тренд на возрастание увлажнения, для всех трех зон $p < 0.05$.

Построена карта трендов АВЭМ для северной части Евразии, используя карту прогноза изменения влажности почвы, рисунок 4.2.11, провели сравнительный анализ, где выделили три зоны совпадения значений, на западной и северо-восточной части наблюдается убывающий тренд, а в центральной части наблюдается значимый тренд на возрастание увлажнения, из этого следует, что в дальнейшем в зонах для убывающих трендов

ситуация ухудшиться, в зоне, где тренд возрастающий, ситуация останется стабильной.

Построена карта трендов по летним месяцам (июнь-август) для Северной Америки и Северной части Евразии с 2002 по 2015 год, так как интересует связь АВЭМ и бореальных лесов для которых вегетационный период на северных территориях достаточно короткий и попадает преимущественно на летние месяца. По сравнению с зонами, отмеченными на картах трендов за весь год, зоны, отмеченные на картах летних трендов пространственно остались там же, и стали более ярко выражены, что свидетельствует о том, что вклад в трендах за весь год преимущественно из за летних месяцев.

Построен график среднелетней динамики водной массы, индекса сухости, температур и осадков с 2002 по 2015 год для Северной Америки и Северной части Евразии, по графику определили самые засушливые года и построены года минимумов АВЭМ и индекса сухости для этих территорий, анализируя самые засушливые года в западной части Северной Америке получил следующие результаты начиная с 2008 года по 2015 площадь засухи с низким показателем АВЭМ каждый год увеличивалась.

Построены графики минимумов годов с 2002 по 2015г для Северной Америки, сопоставляя карту прогноза изменения влажности почвы рисунок (4.2.28) можно увидеть, что зоны засухи совпадут с зонами засухи карты суммарного вклада годов минимумов АВЭМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Hakansson, L. E. Boreal forest and climate change : учебник L. E. Hakansson. – Sweden :Lehan, 2009. – 32 с.

2 Задорнова, О. И. Сравнительная характеристика зарубежных индексов оценки засух по основным зерносеющим субъектам европейской территории России : учебник / О. И. Задорнова. – Обнинск : Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, 2015. – 14 с.

3 Киселёв, А. В. Связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли (по данным съемок спутниками GRACE) / А.В. Киселёв, Н.Р. Муратова, В.И. Горный, А.А. Тронин. // Санкт-Петербург : Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Том. 12. - 2015. - № 6. -С.7-16.

4 Григорьев, В. Ю. Влагосодержание снежного покрова европейской части России по данным спутниковой гравиметрии : монография / В. Ю. Григорьев, А. А. Телегина. – Москва : Институт водных проблем РАН, 2009. – 7 с.

5 Семёнова, И. Г. Оценка пространственно-временного распределения засух на Украине в вегетационный период / И. Г. Семёнова // Одесский государственный экологический университет. - 2014. - С. 134-146.

6 Тренд общей обводненности европейской части России, выявленный по спутниковым данным GRACE : И. Ю. Савин, М. Л. Марков, С. В. Овечкин, В. А. Исаев. – Москва :Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2016. – 14 с.

7 Зотов, Л. В. Многоканальный сингулярный спектральный анализ данных по гравитационному полю Земли со спутников GRACE : науч. изд. / Л. В. Зотов, С. А. Носова, М. В. Баринов. – Москва : ГАИШ МГУ, 2009. –5 с.

8 Center for Environmental Data Analysis - описание Climatic Research Unit. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/3f8944800cc48e1cbc29a5ee12d8542d>.

9 Analytics - описание пять способов расчета линейного тренда. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://4analytics.ru/5-sposobov-rascheta-znachenii-lineienogo-trenda.html>.

10 Fandom - описание Математика. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://ru.math.com/Кореляция>.

11 Математическая статистика - описание Линейный коэффициент корреляции Пирсона. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://statpsy.ru/pearson/linear-pirson>.

12 StatSoft - описание Элементарные понятия статистики. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://statsoft.ru/home/textbook/esc.html>.

13 ArcGIS - описание ArcGIS. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ArcGIS>.

14 ERDAS Imagine - описание ERDAS Imagine. [Электронный ресурс]: - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/ERDAS_Imagine.

15 StatSoft - описание Статистика. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://statsoft.ru>.

16 GRACETellus: MonthlyMassGrids - LandDownload. [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/monthly-mass-grids-land>.

17 DIGITAL.CSIC: SPEIbase v.2.4 Download. [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://digital.csic.es/handle/10261/128892>.

18 Climatic Research Unit: CRU TS Version 3.24.01 Download. [Электронный ресурс]: - Режим доступа: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_3.24.01.

19 Изменение климата 2013 г. Физическая научная основа / Межправительственная группа экспертов по изменению климата. — Женева, 2013. — 222 с.

20 Массовое усыхание лесов на северо-западе России : А. В. Жигунов, Т. А. Семакова, Д. А. Шабунин. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства. 2015. – 43 с.