XXIV Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»

Эмпирические эталоны сезонной динамики коротковолнового вегетационного индекса SWVI по полигону Верхняя Березовка

Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н.

Институт физического материаловедения СО РАН

Москва-2026

Актуальность:

В настоящее время актуальны исследования и разработки методов оценки и мониторинга последствий лесных пожаров и постпирогенного восстановления лесной растительности на основе данных дистанционного зондирования Земли. Эффективным инструментом для оценки состояния и изменений лесной растительности являются спутниковые вегетационные индексы, в частности коротковолновой вегетационный индекс SWVI показал более высокую чувствительность при оценке послепожарных последствий. При этом основное внимание уделялось многолетним изменениям индекса, в то время как потенциальные возможности сезонной динамики недостаточно изучены. Для сравнительного анализа долговременных изменений и количественной оценки степени восстановления сезонной динамики индекса SWVI необходимы эталонные сезонные кривые, характеризующие исходное, конечное и альтернативное (при замещении основной породы) состояние леса.

Цель исследования:

создание на основе архивных данных Landsat эталонов сезонной динамики коротковолнового вегетационного индекса SWVI типичных для территории исследования.

Задачи:

- определение характерной формы и структуры сезонного хода индекса SWVI;
- расчёт статичных и динамических показателей (средних значений, характеристик разброса и скорости изменений).

Территория исследования

Территория исследования расположена в окрестностях г. Улан-Удэ (Республика Бурятия, Байкальский регион), географические координаты: 107,64° в.д., 51,90° с.ш. Полигон «Верхняя Березовка» включает несколько участков. На временном интервале 2015-2022 гг. три из них (сосновый лес, смешанный лес и открытая поверхность без растительности) квазистабильны, подвержены только межгодичным и сезонным изменениям окружающей среды и в дальнейших исследованиях являются референсными (эталонами) для сравнительного анализа. Все участки расположены по соседству, входят в локальную экосистему, одну из многих в сложной мозаике Байкальского региона, и подвержены общему воздействию многолетних тенденций изменений температуры и количества осадков.

Согласно архивным данным метеостанции г. Улан-Удэ с 70-х годов XX века наблюдается тренд роста среднегодовой температуры со скоростью 0,426℃/10 лет (r^2=0,53). В 2000-2025 гг. диапазон среднегодовых температур составил 0,55±0,32℃, среднее количество осадков 247±22 мм с доверительной вероятностью 0,95. большая часть периода исследования относится к засушливому периоду с пониженным количеством осадков относительно нормы 347 мм и повышенной среднегодовой температурой при норме 0,5℃

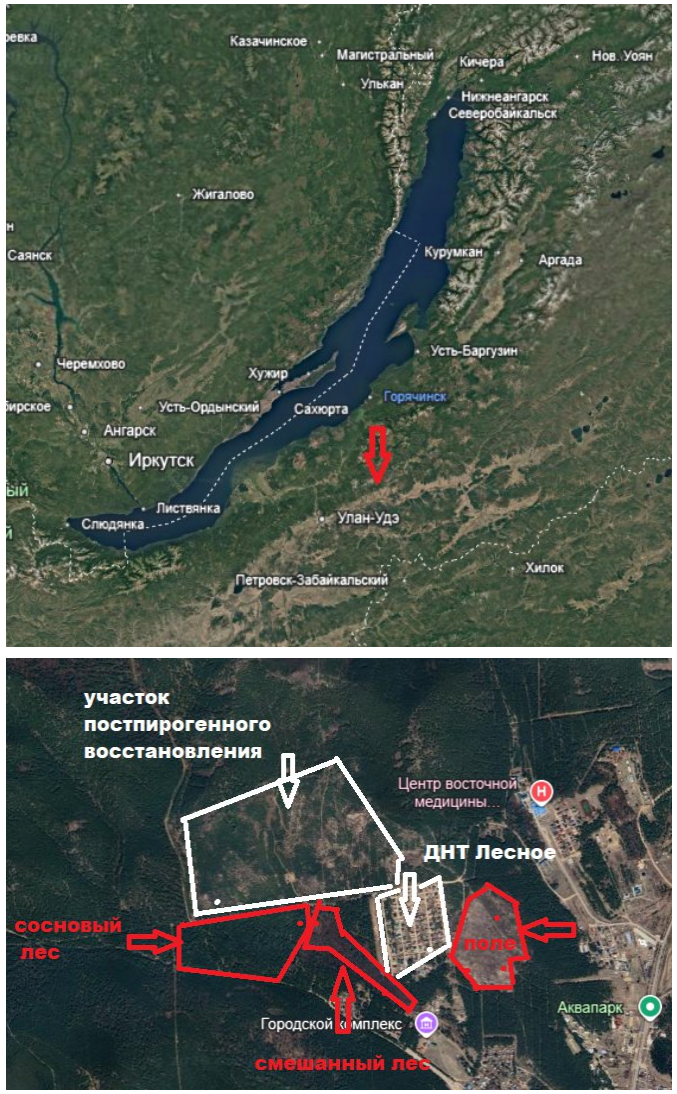
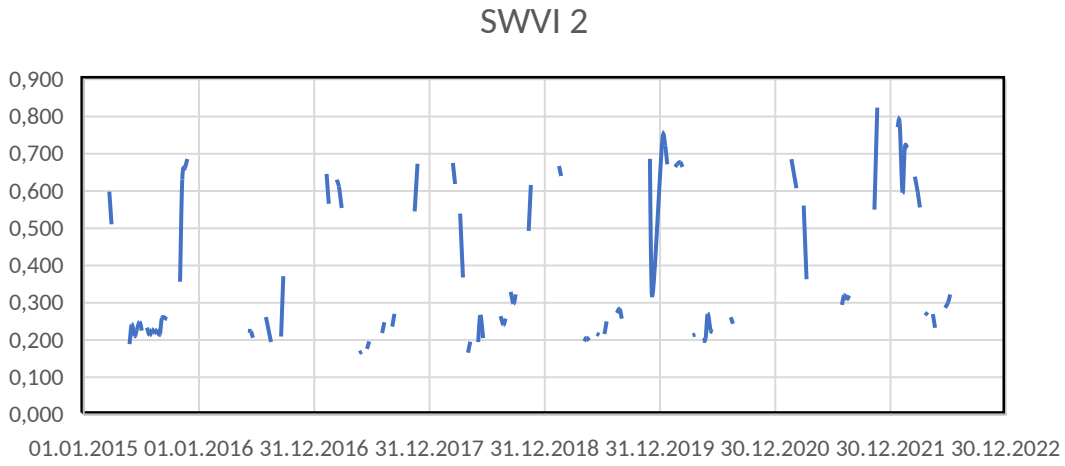


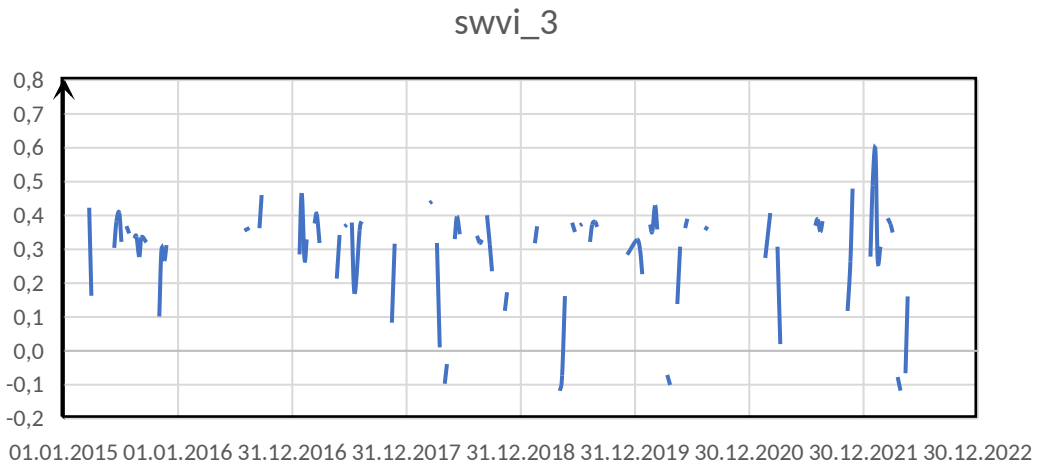
Рис.1. Территория исследования и контрольные участки (красные контуры).

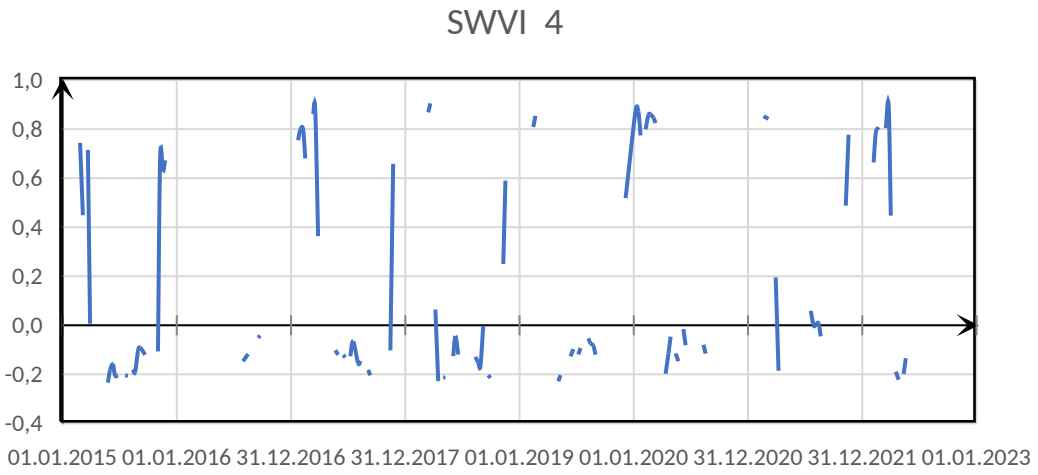
Спутниковые данные



Временные ряды усреднённых по территории исследуемых участков коротковолновых вегетационных индексов SWVI сформированы с помощью Google Earth Engine (GEE) — облачной онлайн-платформы для анализа геопространственных данных и спутниковых снимков с инструментами параллельных вычислений и обработки больших массивов данных в облаке.

Рис.2. Временные ряды индекса SWVI контрольных участков: 2 – соснового леса, 3 – смешанного леса, 4 – открытого участка.





Основы методики формирования сезонных эталонов

Основные проблемы при анализе сезонного хода индекса SWVI заключаются в значительном количестве неравномерно распределённых пропусков (около 50%) вследствие облачности, а также чувствительности к флуктуациям условий наблюдения, сроков наступления и продолжительности основных фаз и процессов вегетации.

Предлагаемый метод основан на трансформации выбранного многолетнего отрезка временного ряда SWVI в условный более плотный годичный интервал, где каждое значение SWVI занимает своё место в соответствии с днём съёмки (или долей года). При периодичности съёмок Landsat в 16 суток каждый год происходит смещение дат на 2-3 суток (для високосных и невисокосных лет). Для максимальной плотности (до 10-12 съёмок за месяц) условного годичного ряда (или частоты дат съёмок) достаточно 5-6 лет. Исключение составляет декабрь с 4 безоблачными сеансами за 20 летний период, в осенние месяцы (октябрь-ноябрь) количество безоблачных сеансов почти в 2 раза меньше среднего.

При балансе засушливых и влажных лет и разнообразия условий съёмки можно рассчитать эмпирические усреднённые сезонные кривые SWVI, свободные от влияния межгодичных флуктуаций, характеристики разброса и скорость сезонных изменений.

Предположительно это позволит в дальнейшем использовать результаты в качестве эталонов при исследовании постпирогенной динамики сезонного хода SWVI нарушенных участков, при оценке влияния климатических условий на изменение сезонного хода SWVI ненарушенных участков леса и открытой поверхности без растительности и т.п.

Условные (уплотненные) годичные ряды и усреднённые сезонные кривые SWVI

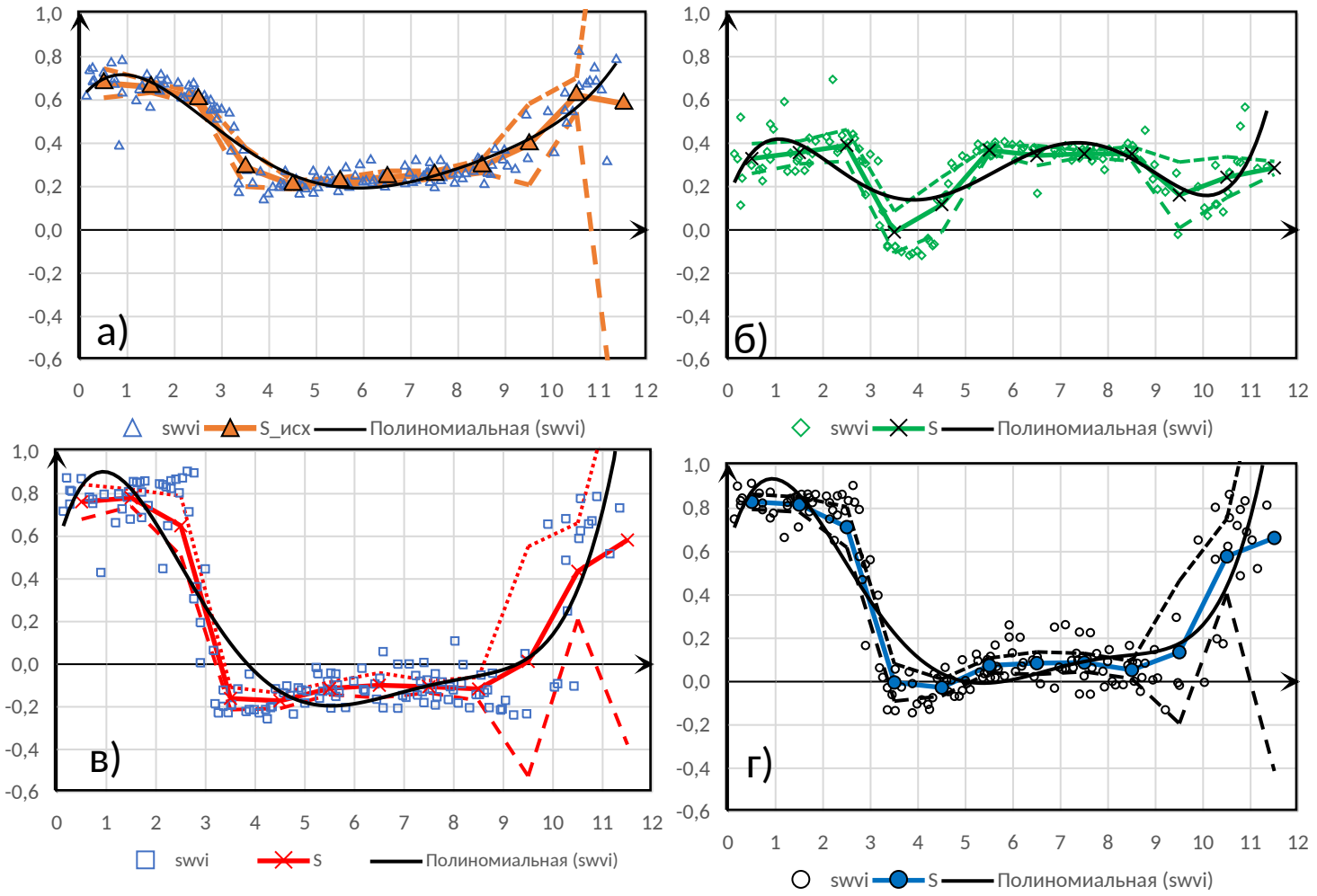


Рис.3. Уплотнённые годичные ряды SWVI и эталонные сезонные Кривые, доверительные интервалы и аппрокимация

На рис.3 представлены условные годичные ряды, усреднённые сезонные кривые индекса SWVI, доверительные интервалы (ДИ) при уровне доверия 95% для трёх контрольных участков (соснового (а) и смешанного леса (б), открытого участка (в)) по данным Landsat-8 за 2015-2020 гг. По оси абсцисс отложено время в месяцах. По оси ординат величины индекса SWVI. Черные кривые – аппроксимация сезонного хода полиномами 5-й степени (r^2 от 0,343 до 0,831).

Для сравнения также приведены аналогичные графики для участка постпирогенного восстановления (г).

Форма и структура сезонных кривых зависит от наличия или отсутствия растительности, породного состава леса, сомкнутости лесного полога. Структура сезонного хода SWVI состоит из 2-3 продолжительных основных фаз и 2-4 быстротечных фазовых переходов.

Особенности структуры сезонных хода SWVI

Основные фазы:

1) Зимнее плато с доминированием роли снежного покрова в декабре-марте, причём степень влияния снега увеличивается при снижении растительной фракции на участке: наименьшее для соснового и смешанного леса (рис.2.а-б), наибольшее для открытой поверхности и участка подроста (рис.2.в-г).
2) Весенний и осенний минимумы с доминированием роли почвенного покрова в мае и сентябре-октябре (для зрелого соснового леса с сомкнутым пологом фаза отсутствует). На участках леса и лесного подроста минимумы менее глубоки чем на открытом участке без растительности. Весенний минимум более глубокий с отрицательными величинами индекса SWVI, осенний менее глубокий, чаще с положительными величинами индекса SWVI, что вероятно, обусловлено влиянием опавшей листвы и хвои.
3) Летний вегетативный «горб» с доминированием роли лесной растительности. В период активной фазы вегетации (май-сентябрь) динамика SWVI существенно различается для участков разного типа: для хвойного леса наблюдается медленный рост и достижение максимума в августе, для смешанного леса после максимума в июне происходит медленное снижение индекса к августу-сентябрю, на открытом участке также наблюдается слабый горб с максимумом в июле, вероятно больше обусловленный максимумом летних температур чем вегетативным ростом травянистой растительности.

Фазовые переходы в весеннее время происходят в 2-3 раза быстрее чем в осеннее.

Продолжительность фазы 2 и фазовых переходов сравнима с периодом повторной съёмки Landsat-8 (16 суток) и из-за влияния облачности эти структурные элементы часто обрывочны, фрагментарны и незаметны в отдельные годы, но хорошо различимы при уплотнении ряда.

Сравнение сезонного разброса индекса SWVI на основе коэффициента чувствительности

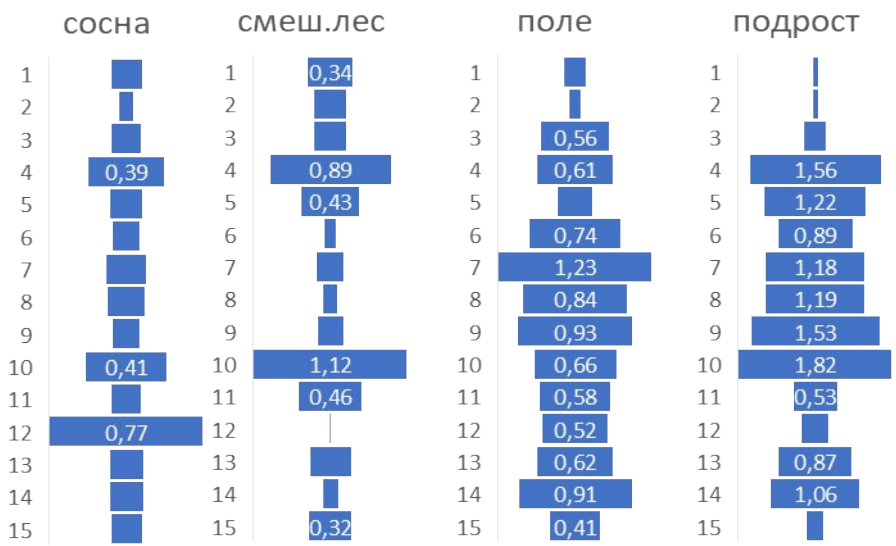


Рис.4. Столбчатые диаграммы (воронки) коэффициента чувствительности

1…12 – январь…декабрь
13 – год в целом
14 – лето (июнь-август)
15 - зима (ноябрь-февраль)

Сезонный разброс значений индекса SWVI зависит как от внутригодичной динамики, так и от межгодичных флуктуаций. Для оценки роли вклада каждого фактора использован коэффициент чувствительности $К_{чувст}$, преобразован к виду:

$$К_{чувст} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}\frac{2\left|SWVI_{i+1}-SWVI_i\right|}{\left|SWVI_{i+1}\right|+\left|SWVI_i\right|}$$

Порог чувствительности равен $К_{порог}$=0,3. При низкой чувствительности $К_{чувст}<К_{порог}$ разброс значений является характеристикой внутригодичной динамики, а внешние условия не играют большой роли, при высокой $К_{чувст} \circledcirc К_{порог}$ – наоборот.

На контрольных участках зрелого леса рис.4 в основном $К_{чувст}< К_{порог}$ за исключением весенних и осенних периодов фазовых переходов.

На открытом участке (поле) в основном $К_{чувст} \circledcirc К_{порог}$ из-за сильного влияния изменений погодных условий, антропогенного воздействия и в периоды фазовых переходов.

Для сравнения представлена воронка коэффициента чувствительности для участка постпирогенного восстановления (подрост), где в основном $К_{чувст} \circledcirc К_{порог}$ из-за роста лесного молодняка.

Сравнение скорости сезонных изменений

Для сравнения ниже приведены доверительные интервалы с доверительной вероятностью 0,95 скорости изменений S в период вегетативной активности (май-сентябрь):

1) Подрост - [0,004; 0,030], в среднем 0,017;

2) Сосновый лес – [0,014; 0,025], в среднем 0,020;

3) Смешанный лес - [0,026; 0,061], в среднем 0,044;

4) Открытый участок - [-0,003; 0,021], в среднем 0,009.

Сравнение средних значений, доверительных интервалов и графиков скорости на протяжении года свидетельствует о промежуточном состоянии скорости сезонных изменений через 12-17 лет после пожара, с большей близостью к эталону «открытый участок», хотя в период активной вегетации средняя скорость ближе к показателю эталона «сосновый лес».

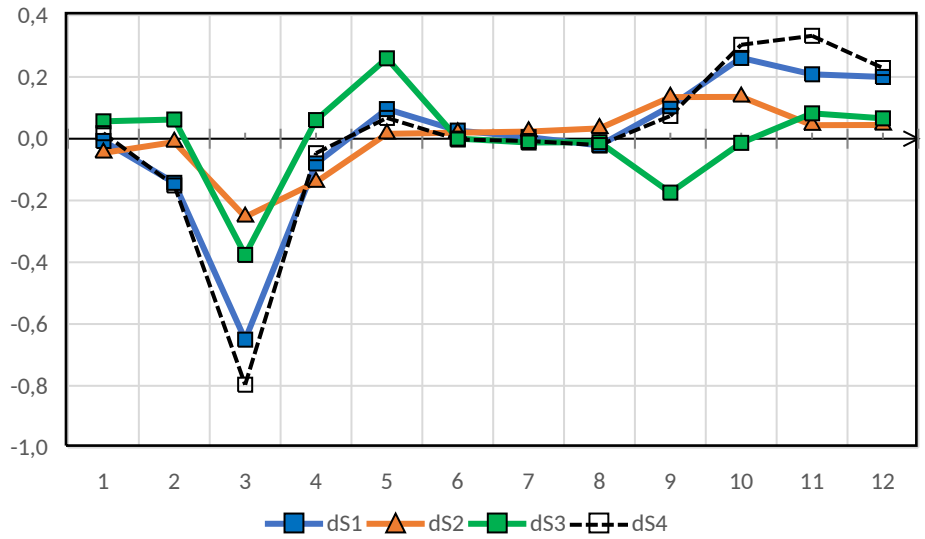


Рис.5. Скорость сезонного изменения индекса SWVI контрольных участков и участка постпирогенного восстановления на 2015-2020 гг. (12-17 лет после пожара)

Динамика корреляции характеристик сезонного хода SWVI участка постпирогенного восстановления и эталонных участков

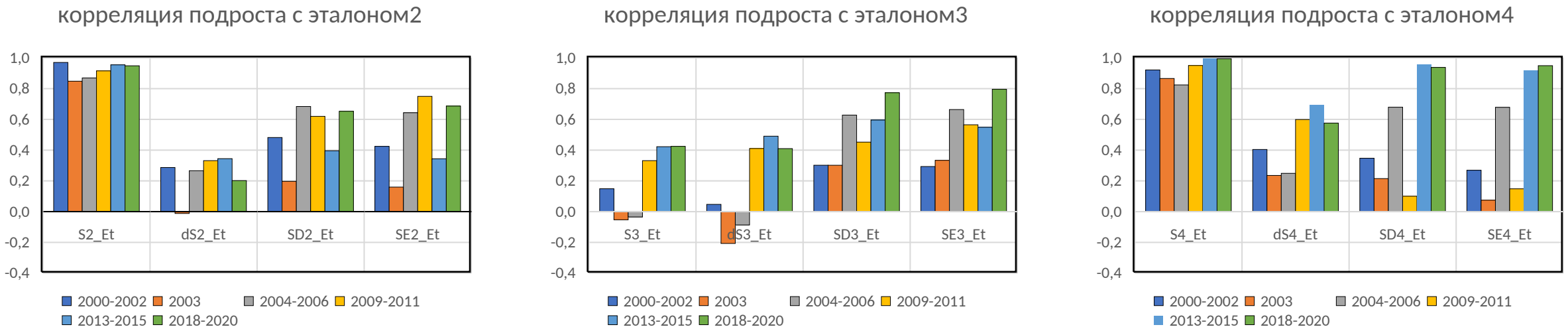


Рис.6. Динамика корреляции сезонного хода S, скорости сезонных изменений dS, и характеристик разброса индекса SWVI участка постпирогенного восстановления и эталонных участков (соснового леса –эталон2, смешанного леса – эталон3, открытого участка – эталон4)

Гистограммы рис.6 представляют постпирогенную динамику коррелированости сезонного хода S (среднемесячных значений SWVI), скорости сезонных изменений dS и характеристик разброса (стандартного отклонения SD и стандартной ошибки SE) участка постпирогенного восстановления (подроста) и эталонных участков.

Как видно по графикам высокая корреляция всех характеристик сезонного хода SWVI исследуемого участка подроста и эталонных характеристик соснового леса значительно снижается в год пожара (2003 год) и медленно восстанавливается. После пожара также наблюдается увеличение корреляции всех характеристик сезонной динамики участка подроста с эталоном 3 (смешанным лесом), что вероятно обусловлено вкладом лиственных и кустарничковых на начальном этапе послепожарного периода восстановления. Сравнение демонстрирует Более высокую корреляцию всех показателей сезонной динамики исследуемого участка «подрост» с эталоном4 «поле» с 2013 г.по 2020 гг. (спустя 10-17 лет после пожара).

Заключение

- Разработана методика формирования сезонных эталонов коротковолнового вегетационного индекса SWVI на основе уплотнения многолетних архивных данных Landsat-8. Построены 3 эталона характеризующих исходное, конечное и альтернативное состояния постпирогенной динамики на территории исследования (полигон Верхняя Березовка).
- Подтверждено, что форма и структура сезонных кривых индекса SWVI зависит от наличия или отсутствия растительности, породного состава леса, сомкнутости лесного полога. Установлена структура эталонных сезонных кривых, состоящая из 2-3 продолжительных основных фаз с доминированием вклада снега, почвы (фаза отсутствует у сомкнутого соснового леса) и лесной растительности и от 2 до 4 быстротечных межфазовых перехода.
- Обнаружена более высокая корреляция характеристик сезонной динамики за целый год участка постпирогенного восстановления с эталонным открытым участком без растительности спустя 12-17 лет после пожара, а также положительная динамика восстановления корреляции с эталоном «сосновый лес».

Спасибо за внимание