

УДК 911.52; 911.2

ЛАНДШАФТНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИКИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

© 2020 г. Т.И. Харитонова, Н.В. Сурков

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, ГСП-1. E-mail: kharito2010@gmail.com*

Поступила в редакцию 10.05.2019. После доработки 29.08.2019. Принята к публикации 30.09.2019

В статье рассматриваются дистанционные методы описания внутрисезонной динамики влажности почвенно-растительного покрова. Полевая влажность почвенно-растительного покрова описывается интегральным показателем, который учитывает влагосодержание верхнего горизонта почв (5-10 см), травяной фитомассы и листьев древесно-кустарниковой растительности. Полевая интегральная влажность демонстрирует достоверную связь с нормализованным разностным влажностным индексом (NDWI) с коэффициентом детерминации R^2 , достигающим значений 0.91 для отдельных классов урочищ. Наиболее значимыми факторами, определяющими потерю влаги за летний период, являются объем фотосинтетически активной фитомассы, потенциальное поступление солнечной радиации за исследуемый период и запас влаги в почве и растительности в начале вегетации. Эти факторы описывают 67% разницы NDWI в период с мая по август 2016 года в лесных участках и 89% в степях. Полученные результаты могут быть использованы для поиска пожароопасных участков в степях и лесах, а также для мониторинга виноградников.

Ключевые слова: Карадагский заповедник, влажность почвенно-растительного покрова, NDWI, семиаридные ландшафты Крыма.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10079

Мониторинг влажности почвенно-растительного покрова важен в первую очередь для прогноза биологической продукции экосистем, расчета поливных норм в сельском хозяйстве, обеспечения своевременных противопожарных мер. Разработано три подхода к дистанционному определению влажности: на основе отражения земной поверхностью солнечного излучения в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн (0.4-2.5 мкм), на основе отражения и собственного излучения земной поверхности в тепловом (10-13 мкм) и в микроволновом (2.7 мм – 30 см) диапазонах.

Распознавание данных *микроволновой съемки* основано на тесной связи диэлектрической постоянной почвы с ее влажностью: с увеличением влажности растет диэлектрическая постоянная и увеличивается поток микроволнового излучения (Dobson, Ulaby, 1985). Одновременно микроволновый сигнал зависит от рельефа, шероховатости поверхности и свойств растительного покрова. Так как влажность почвы изучается главным образом в динамике, то характеристики рельефа и шероховатость поверхности принимаются неизменными за исследуемый период. При всех вышесказанных допущениях модели влажности почв, созданные по данным активных и пассивных микроволновых приемников, показывают относительно высокую точность с R^2 от 0.49 до 0.67 (Escorihuela, Quintana-Seguí, 2016). Более высокую достоверность (R^2 до 0.85) показывают модели, построенные для ровных поверхностей с более или менее однородной растительностью, то есть для сельскохозяйственных полей (Wigneron et al., 1995).

Главным преимуществом систем дистанционного зондирования, работающих в микроволновом диапазоне, является широкополосная съемка, позволяющая получать данные о состоянии земной поверхности ежедневно или даже дважды в сутки (AMSR-E, AMSR2). Существенным их недостатком является мелкий масштаб: у приемников AMSR пространственный масштаб составляет 5.4-56 км в зависимости от длины волны; у приемника SMAP разрешение повышено до 1-3 км при снижении частоты съемки до 2-3 дней.

Интерпретация данных *тепловой съемки* основана на зависимости разницы температуры воздуха

и земной поверхности от интенсивности испарения (Seneviratne et al., 2010). Повышение разницы температур сигнализирует о замедлении испарения и, соответственно, о недостатке воды в почве. Данная методика дает довольно точный результат для расчета поливных норм на полях с более или менее сходными посевами (Ghulam et al., 2008). При исследовании более сложного ландшафтного покрова неоднородность растительности создает ошибки моделирования. Температура поверхности почвы и листьев рассчитывается на основе данных тепловой спутниковой съемки, температура воздуха должна быть получена инструментально, что создает дополнительную сложность данного подхода.

Более распространенным методом, предложенным M.S. Moran с соавторами (1994), является статистическое моделирование дефицита почвенной влаги в факторном пространстве яркостной температуры земной поверхности и вегетационного индекса NDVI. Суть метода заключается в том, что каждый фитоценоз имеет нижнюю и верхнюю границы яркостной температуры, соответствующие состояниям полного насыщения влагой почвы и ее полного иссушения. Температура оголенной почвы меняется в более широких диапазонах. Все сочетания температуры и NDVI формируют в признаковом пространстве фигуру трапецоида. Форма трапецоида имеет региональную специфику и для точного определения требует большого объема полевого материала, собранного в разных ландшафтных условиях и климатических состояниях (Carlson, 2007). При хорошей калибровке модели достоверность определения дефицита влажности высокая – $R^2=0.6-0.9$ (Sadeghi et al., 2017), а спутниковая съемка, производимая одновременно в оптическом и тепловом диапазоне, позволяет довольно оперативно получать информацию о состоянии земной поверхности.

Исследование влажности земной поверхности по данным *оптической* съемки основано на изменении отражательной способности листа в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах (БИК 700-1300 нм, СРИК 1300-3000 нм), которая определяется изменением клеточной структурой листа при обезвоживании (Peuelas et al., 1993) и напрямую зависит от фактического содержания воды в листе (Gillon et al., 2004; Yebrá et al., 2013). Метод оценки содержания влаги в растительном покрове по дистанционным данным обоснован в работах В.-С. Gao (1996) и Р. Сеccато с соавторами (2002). Все методы опираются на соотношение отражения в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, выраженное в разных вариантах спектральных влажностных индексов с различными поправками.

Вышеперечисленные методы имеют одинаковые особенности. Во-первых, все они базируются на аксиоме о тесной зависимости влажности почвы и растительности. Принимается, что отражение незадернованной почвы дает информацию о влажности верхних 5-10 см почвы, а растительность – о влажности корнеобитаемого слоя, при этом все методы стремятся привести данные съемки либо к влажности почвы (применяется при интерпретации микроволнового и теплового излучения), и тогда растительность является помехой (Швецов и др., 2013), либо к влажности фитомассы (в случае интерпретации оптических каналов), и в этом случае большие ошибки наблюдаются на территориях с разреженной растительностью. Во-вторых, все модели калиброваны не на абсолютные значения содержания влаги в почве и растительности, а на ее отклонение от минимального или максимального содержания, чаще всего на дефицит влажности. В-третьих, процесс потери влаги идет по-разному в разных природных условиях, и чаще всего модели калибруются для разных типов растительного покрова (Сеccато et al., 2002), но уже встречаются работы, где учитывается ландшафтная неоднородность, так W. Nijland с соавторами (2015) при исследовании влагозапасов в лесной кроне использовали эдафическую матрицу Погребняка. В-четвертых, все модели дают высокие показатели достоверности на относительно выровненных территориях, их применение в горных территориях либо невозможно, как для микроволновой съемки, либо плохо изучено.

Целью данного исследования являлось построение статистической модели, позволяющей оценить сезонную динамику влажности почвенно-растительного покрова ландшафтов восточной оконечности Крымских гор по данным оптической съемки Landsat-8. Проблема разделения вклада почвенной влаги, влаги травяного, кустарникового и древесного яруса в интегральное отражение была решена введением показателя, учитывающего доленое участие каждого яруса в общем сигнале. Прогрессирующее иссушение территории в летний период (Трансформация ..., 2009), позволило нам оценить динамику влажности почвенно-растительного покрова в отношении к наиболее увлажненным условиям, которые наблюдались в середине мая. Моделирование проведено для классов урочищ, отражающих разнообразие растительности, экспозиции и морфометрии рельефа.

Материалы и методы

На территории Карадагского заповедника и заказника Эчкидаг было заложено 38 точек ландшафтных описаний и отбора проб (рис. 1). Отбирались пробы древесной листвы (при наличии), укос травяной растительности с площади 50x50 см, при значительном проективном покрытии отдельно отбирались пробы опада, сухой массы злаков или мохового покрова. Пробы почвы отбирались методом конверта с глубины 5-10 см. Отбор проб из верхних 5 см не производился, т.к. в них сильнее выражены внутрисуточные колебания влажности и за ними «теряется» её динамика на более длинных временных отрезках (Горбунов и др., 2015). Определение влажности образцов проводилось весовым методом и рассчитывалось как отношение потери массы при высушивании к массе влажного образца.

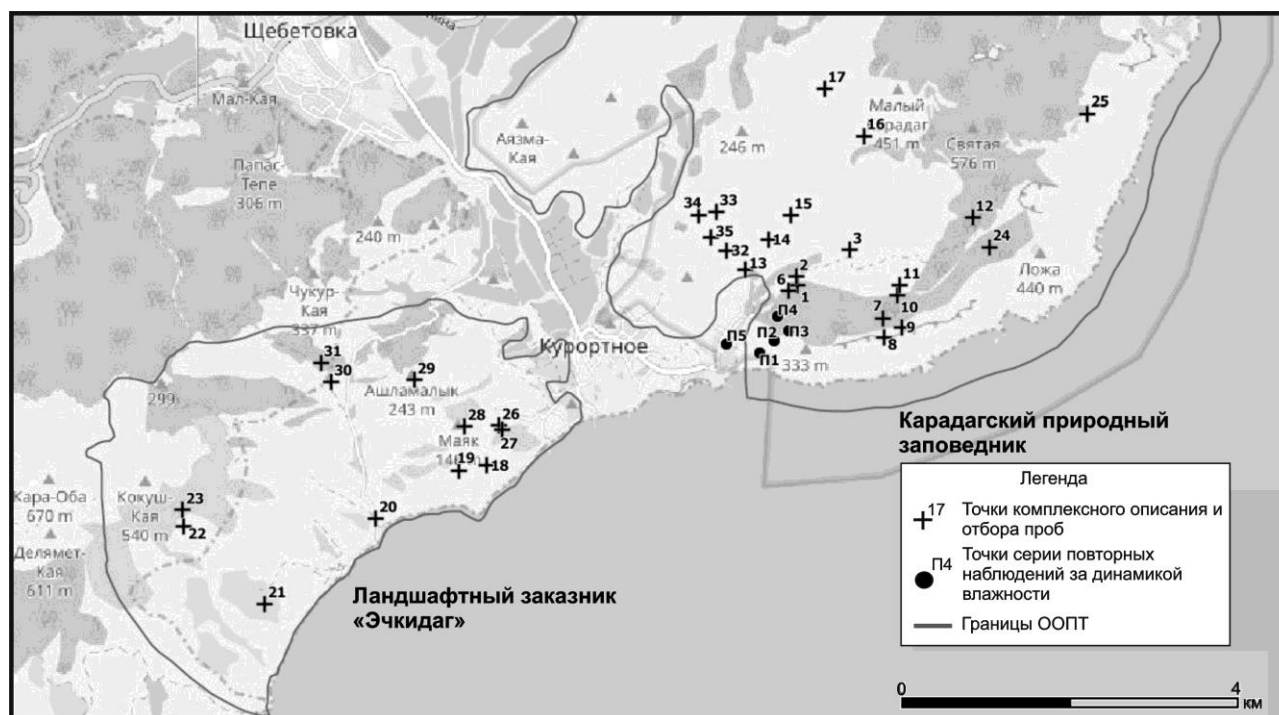


Рис. 1. Территория исследования и точки отбора проб.

Морфометрический анализ рельефа производился на основе цифровой модели рельефа с пространственным разрешением 30 м, построенной методом ординарного кригинга по горизонталям, оцифрованным с топографической основы масштаба 1:50000. Потенциальное перераспределение влаги по рельефу оценивалось по влажностному индексу SAGA Wetness Index, рассчитанному как логарифм отношения удельной площади водосбора к уклону данной ячейки растра (Böhner, Selige, 2006). Потенциальная солнечная радиация вычислена в программе SAGA на основе морфометрии рельефа, высоты солнца и продолжительности светового дня (Сысуев, 2003).

Действительная влажность почвенно-растительного покрова определена как гипотетическая толщина слоя воды в листе растения или тонком приповерхностном слое субстрата, которая оценивается с помощью нормализованного разностного влажностного индекса NDWI с формулой $NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$, где NIR – отражение в ближнем диапазоне, SWIR – отражение в среднем инфракрасном диапазоне длин волн (Maki et al., 2004). В работе использованы безоблачные снимки Landsat-8 за 14 мая, 15 июня, и 27 августа 2016 г. По тем же снимкам был рассчитан нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI.

Так как значение яркости пикселя формируется за счёт отражения от всей поверхности в его границах, то ей может оказаться частично крона дерева или куста, ярус травяной растительности или голая почва. В данной работе влажность почвенно-растительного покрова описывается интегральным показателем, который комбинирует значения влажности почвы, травяной фитомассы и листвы деревьев. Таким образом, мы получаем полевой слой воды в видимом для спутниковой съемки

почвенно-растительном покрове. Он рассчитывается, как:

$$V = a * V_{\text{лист}} + b * V_{\text{трав}} + c * V_{\text{почв}},$$

где V – интегральная влажность, $V_{\text{трав}}$ – влажность травяной фитомассы, $V_{\text{почв}}$ – влажность верхнего слоя почвы, $V_{\text{лист}}$ – влажность древесной листвы, a – сомкнутость крон деревьев, b – проективное покрытие травяного яруса в долях от единицы в случае, когда $(a+b) \leq 1$; принимается равным $(1-a)$ в случае, когда есть частичное перекрытие ярусов, c – доля оголённой почвы, вычисляется как $1-(a+b)$; принимается равным нулю при $(a+b) > 1$. Сумма коэффициентов a , b и c равна 1, а учитываются они в порядке ярусности.

Анализ динамики влажности проводился с учетом ландшафтных условий территории. Для построения карты классов урочищ применена управляемая классификация многозональных снимков Landsat-8, к которым был применён метод извлечения трёх главных компонент. Внутри каждого класса ландшафтного покрова проведено деление по рельефу. Рельеф описан с помощью двух параметров: крутизны и экспозиции склона. В этой работе выделены три класса крутизны (поверхности с наклоном до 10° , $10-25^\circ$ и свыше 25°) и два класса экспозиции (холодные и тёплые, границей между которыми выбраны азимуты 125° и 305°). Всего получено 17 классов природных комплексов, из которых 14 охарактеризованы сетью наблюдений (рис. 2).

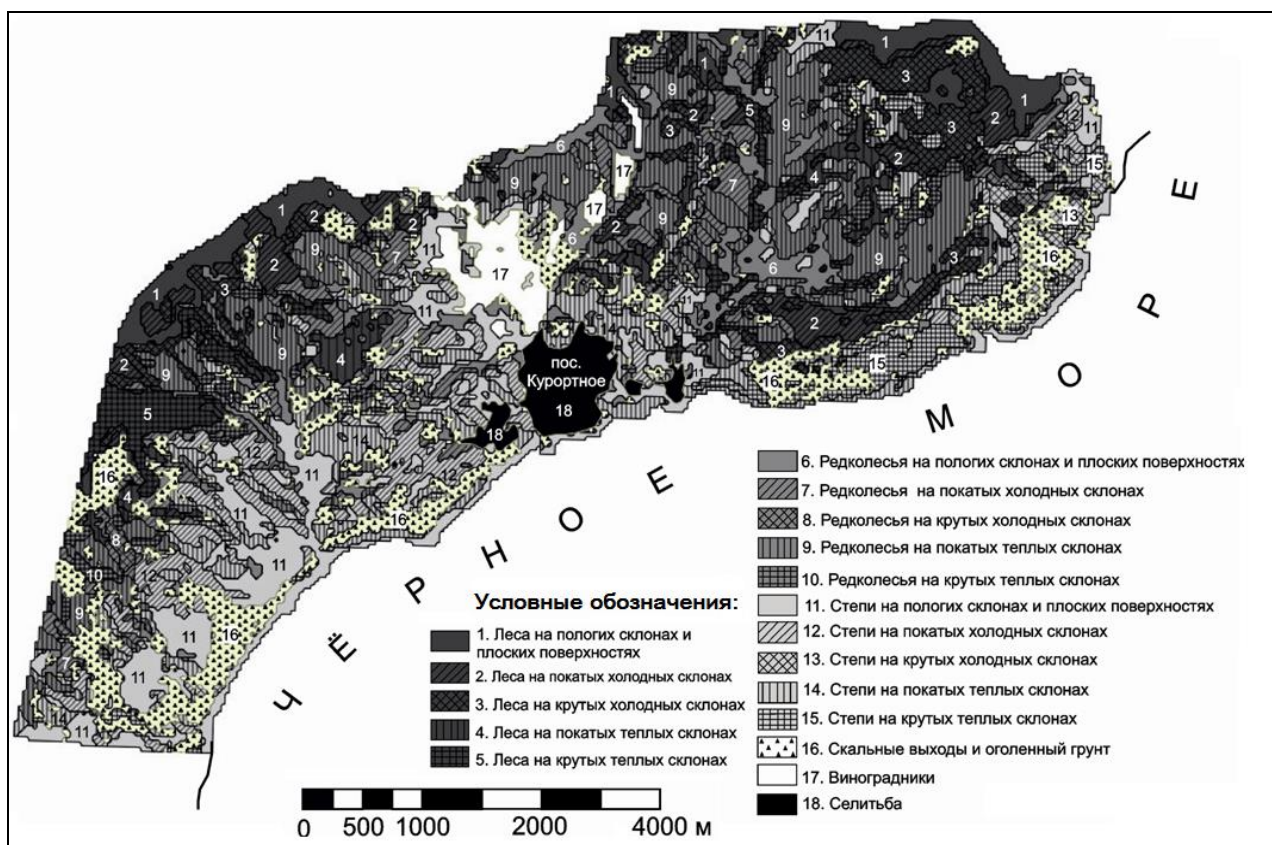


Рис. 2. Классы урочищ.

Результаты и их обсуждение

Ландшафтная структура территории. Территория исследования отличается высоким ландшафтным разнообразием, обусловленным различием абсолютных высот, геологической основы и экспозиции склонов. Верхние этажи гор заняты скальнодубовыми лесами с грабниником, ясенем и кизилом на бурых лесных почвах и пушистодубовыми лесами с фисташкой, ясенем и можжевельником на коричневых почвах. На выходах плотных известняков и вулканических пород выше 200 м формируются петрофитные степи с разреженным и низким травостоем, чередующиеся с обнажённым грунтом. На делювиально-коллювиальных шлейфах и нижних частях склонов, сложенных неоген-четвертичными рыхлыми породами, распространены фисташково-дубовые

редколесья с держидеревом. На южных склонах и плоских морских террасах их сменяют степи: от сухих эгилопсово-типчачковых до более влажных ковыльно-разнотравных. На отдельных участках террасированных склонов находятся посадки сосны. К северу от пос. Курортное расположены виноградники. Всего на лесные ПТК приходится 21.2% площади, на редколесные – 31.9%, степные занимают 29.1%, на обнажения скальных и рыхлых пород приходится 12.5%, а селитебные земли и виноградники занимают 2.6 и 2.7% площади соответственно.

Полевая влажность почвенно-растительного покрова. Ландшафтное разнообразие определило высокую вариативность влажности почвы и растительности. Наибольшая влажность почвы (34%) зафиксирована в днищах балок, покрытых редколесьями из ясеня и держи-дерева и дубово-ясеневыми лесами с развитым травяным и моховым покровом, и на покатых северных склонах, сложенных рыхлыми породами. Точки с наиболее сухой почвой (13%) приурочены к крутым южным и юго-западным склонам с разреженными пушистодубовыми лесами или с петрофитными степями. Также сухие почвы характерны для средних частей склонов или коллювиальных шлейфов с каменистыми почвами, способными быстро проводить влагу вниз из верхних горизонтов. Для природных комплексов, подвергающихся выпасу скота или неорганизованной рекреации, характерны меньшие значения влажности почвы (до 10-12%), чем для их аналогов в заповедной зоне.

Запас влаги в листьях древесно-кустарникового яруса зависит, в первую очередь, от породного состава. Меньше влаги содержится в листе дуба пушистого (44-47%), но при густом подлеске из грабинника, что характерно в большей степени для затененных склонов северной экспозиции, средняя влажность листы таких лесов достигает 68-71%. Максимальная влажность травяной фитомассы зафиксирована под густым пологом пушистодубовых лесов и сосновых лесопосадок (75-80%). Высоким запасом влаги обладают и сообщества луговых степей (67-73%). Наименьшая влажность травяного яруса зафиксирована в степных ПТК террас и коллювиальных шлейфов и в лесных ПТК плоских расширенных днищ балок (43-51%).

Максимальные значения интегральной влажности почвенно-растительного покрова (63-69%) зафиксированы в точках, приуроченных к залесённым или закустаренным днищам балок либо к «холодным» пологим склонам под закустаренными остепнёнными лугами. Природные комплексы, подверженные антропогенному воздействию, способны удерживать меньше влаги в сравнении с заповедными аналогами (47-52% и 58-63% соответственно). Минимальные значения интегральной влажности (18-27%) определены на крутых, почти осыпных южных склонах со слаборазвитой растительностью. Низкая интегральная влажность редколесных и степных ПТК южных склонов и ровных поверхностей террас усугубляется небольшим проективным покрытием травостоя (15-40%) или низкой сомкнутостью крон, не превышающей 0.3. Важным обстоятельством является большая доля злаков (например, эгилопса) с высохшими надземными частями в растительном покрове. На редколесных точках с минимальной интегральной влажностью преобладает кустарниковая растительность (держи-дерево, груша лохолистная, у которых немного листы) или дуб пушистый.

Валидация значений нормализованного разностного влажностного индекса (NDWI). Интегральный показатель влажности почвенно-растительного покрова описывается значениями NDWI, рассчитанными на 15 июня 2016 года, с коэффициентом детерминации $R^2=0.72$. Зависимость нарушается за счет проб, отобранных в степных урочищах гребней и крутых северных склонов, где, очевидно, происходит искажение дистанционной информации за счет рельефа и светотени (на рисунке 3 эти точки отмечены знаком «X»). Если же рассмотреть эту связь отдельно для разных типов ландшафтного покрова, то точность описания увеличится до $R^2=0.90-0.91$. Заметно различается зависимость полевой влажности и влажностного индекса NDWI на южных склонах, занятых степной и кустарниково-степной растительностью, где NDWI оказывается более чувствительным к изменению полевой влажности (на рисунке 3 показаны квадратными значками), и на остальных точках – лесов и степей плоских вершинных поверхностей и пологих северных склонов, где NDWI нарастает медленнее (на рисунке 3 показаны круглыми значками).

Высокая достоверность описания интегральной влажности почвенно-растительного покрова с помощью влажностного индекса NDWI, рассчитанного на период отбора проб, позволяет перейти от динамики весового содержания полевой влаги к пространственной картине динамики значений NDWI.

Сезонная динамика влажности. Скорость потери влаги почвенно-растительным покровом выражается через разницу индексов NDWI (NDWI-Dif), рассчитанных для условий максимального насыщения почвы и растительности влагой и на интересующую дату. В работе рассмотрено

изменение влажности почвенно-растительного покрова с 14 мая по 27 августа 2016 г. Для построения точной статистической модели были проверены многие факторы, наибольшую связь с разницей индексов NDWI-Dif показали: вегетационный индекс NDVI на 27 августа 2016 г. (относительный показатель количества фотосинтетически активной фитомассы), количество потенциальной приходящей солнечной радиации (ППСП, определяет интенсивность испарения) и влажностный индекс NDWI за 14 мая 2016 г. (характеризует запас влаги, накопленный в почвенно-растительном покрове к началу засушливого периода). Они включены в статистическую модель, описывающую сезонную разницу NDWI. Интересно, что морфометрические характеристики рельефа не показали связь со скоростью потери влаги. Влияние рельефа сказывается косвенно через показатель ППСП, а также «включается» в днищах эрозионных форм.

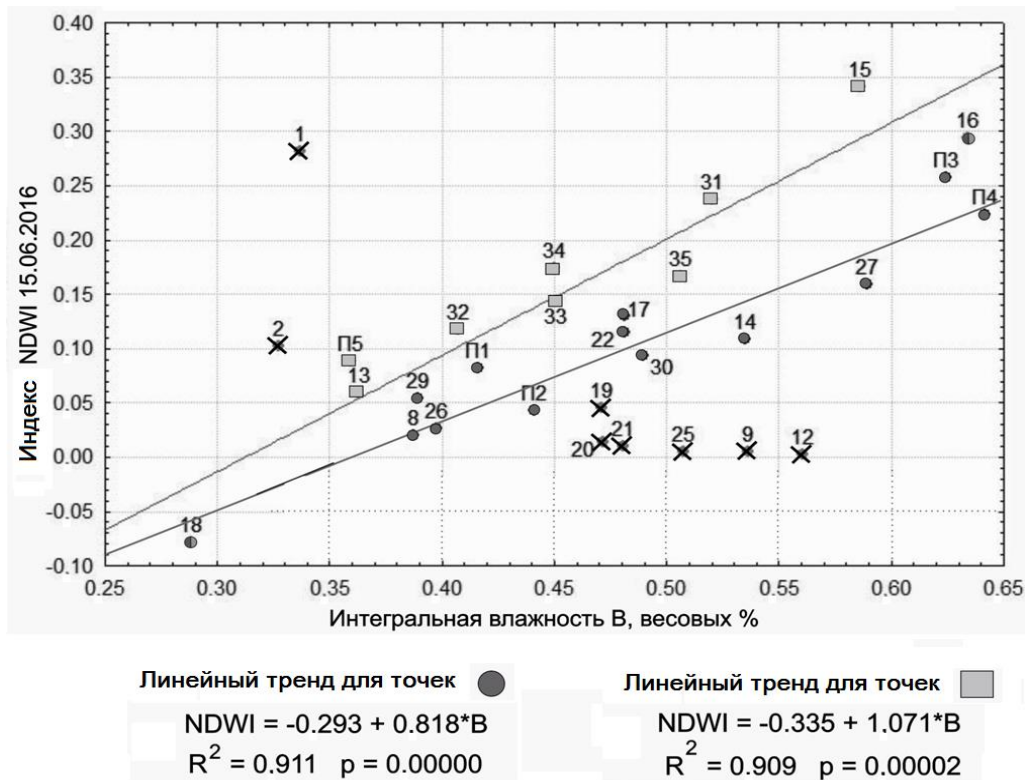


Рис. 3. Связь интегральной полевой влажности (B) и нормализованного разностного водного индекса (NDWI).

Самым мощным фактором, определяющим величину сезонной потери влаги, является количество фотосинтетически активной фитомассы, описанное с помощью NDVI. Коэффициент детерминации для связи NDVI за 27 августа с NDWI-Dif составляет $R^2=0.63$. ПТК с большой долей оголенных почв и интенсивным развитием склоновых процессов обладают низкой способностью к сохранению влаги, низким NDVI как в начале лета, так и осенью, но значительной разностью NDWI, достигаемой, очевидно, за счет иссушения почвы. Сухостепные и степные ПТК в начале лета имеют более высокий NDVI, но к августу сильно иссушаются как почва, так и травяная растительность (снижается NDVI, а вслед за ним и NDWI), поэтому NDWI-Dif в них также велика. В редколесьях NDVI выше, как и способность их к сохранению влаги в растительном покрове, а снижение NDVI за сезон меньше, поэтому и общая потеря влаги также снижена. Наконец, леса обладают максимальными значениями и минимальной разницей NDVI за засушливый период, и запасы влаги в их листьях и травяном покрове испытывают минимальное падение. Стоит заметить, что совокупности точек достаточно сильно перекрываются: так, например, ясеневые леса с высоким держи-деревом имеют примерно такое же значение NDWI-Dif, как дубовые редколесья с сомкнутостью крон около 0.3 и долей оголенной почвы около 0.2. Причиной этого в первом случае служит сильное высыхание листьев ясеня и держи-дерева и частичное её опадение, во втором – быстрое иссушение оголенной почвы.

Для пространственных расчетов был использован модуль Multiple Regression Analysis в программе SAGA, который принимает на вход растровые данные переменных (факторов) и моделирует каждый пиксель зависимой переменной. Каждый тип ландшафтного покрова проанализирован отдельно, а территории населённых пунктов исключены. Результаты этого анализа представлены в таблице. Наилучшая точность модели зафиксирована для виноградников ($R^2=0.94$), типичных степей ($R^2=0.83$) и редколесий ($R^2=0.89$), чуть менее приемлемые результаты моделирования – у сухих и петрофитных степей с крутыми склонами-«бедлендами» ($R^2=0.76$). Наименее четко модель работает в лесных ПТК.

Ведущая роль растительного покрова проявляется и при переходе от точек полевого исследования к пикселям дистанционных изображений. NDVI описывает от 39% (в лесах) до 75% (в типичных степях) варьирования сезонной разности NDWI. В сухих степях с малой фитомассой растительности решающую роль играет количество приходящей солнечной радиации, нагревающей почву и способствующей испарению из неё влаги. В типичных степях возрастает роль растительности. Травяной покров, даже сплошной, сильно теряет влагу за засушливый период (Морозова, Вронский, 1989), поэтому увеличение фитомассы в степных ПТК ведет к возрастанию в них NDWI-Dif. Это объясняет, почему большинство природных пожаров на востоке Крымских гор – степные, и может быть использовано для распознавания пожароопасных участков. В редколесьях ещё возрастает роль растительного покрова, но меняется знак его влияния: чем больше активной фитомассы, тем меньше NDWI-dif. Значимой величиной оказывается исходный запас влаги. В лесах, лучше всего удерживающих влагу, основными факторами становятся фитомасса растительности (NDVI) и количество приходящей солнечной радиации.

Таблица. Результаты множественного регрессионного анализа интенсивности потери влаги почвенно-растительным покровом для разных типов ландшафтного покрова.

Тип ландшафтного покрова	R^2	Стандартная ошибка	Регрессионный коэффициент для факторов		
			NDVI за 27.08	ППСР	NDWI за 14.05
Степи сухие и петрофитные, бедленды	0.76	0.054	0.114	0.212	0.002
Степи типичные	0.83	0.029	0.547	0.075	0.102
Редколесья	0.89	0.028	-0.660	0.302	0.757
Леса	0.67	0.033	-0.370	0.337	0.057
Виноградники	0.94	0.005	-0.811	0.174	1.596

Выводы

1. Моделирование влажности почвенно-растительного покрова на основании нормализованного разностного водного индекса NDWI показывает более высокую достоверность при учете ландшафтной структуры территории. Исследование выявило высокую значимость вклада не только растительных формаций, но экспозиции и крутизны склонов. При ландшафтном подходе точность моделирования для отдельных типов урочищ достигает $R^2=0.90-0.91$.

2. Перераспределение влаги по рельефу не играет существенной роли в формировании условий увлажнения в семиаридных низкогорьях Крымских гор. Атмосферные осадки либо быстро испаряются, либо быстро выносятся эрозионной сетью, не задерживаясь ни на вогнутых, ни на пологих склонах. Исключения составляют днища крупных эрозионных форм, сложенные рыхлыми отложениями, способными удерживать влагу.

3. Растительность является фактором, стабилизирующим динамику влажности почвенно-растительного покрова. Наиболее стабильными являются лесные ПТК. Максимальная потеря влаги за вегетационный период наблюдается в степных ландшафтах.

4. При прогнозах динамики влажности почвенно-растительного покрова в статистическую регрессионную модель включаются: вегетационный индекс, количество потенциальной приходящей

солнечной радиации и исходный (весенний) влагозапас. Лучше всего прогнозу поддаются ПТК виноградников, редколесий, хуже – лесов.

5. Ограничением применения данного метода являются крутые северные склоны, на которых искажается дистанционная информация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горбунов Р.В., Зуев А.В., Смирнов В.О.* 2015. Воднобалансовые исследования на территории Карадагского ландшафтно-экологического стационара // 100 лет Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского. Симферополь: Н. Орианда. С. 734-747.
- Морозова А.Л., Вронский А.А.* 1989. Природа Карадага. Киев: Наукова думка. 286 с.
- Сысуюев В.В.* 2003. Физико-математические основы ландшафтоведения. М.: Географический факультет МГУ. 175 с.
- Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке – начале XXI века. 2010. Симферополь: ДОЛЯ. 304 с.
- Швецов Е.Г., Ружичка З., Миронов В.Л.* 2013. Исследование применимости данных спутника SMOS для оценки уровня пожарной опасности на территории Красноярского края // Вестник СиБГАУ. № 2 (48). С. 110-115.
- Böhner J., Selige T.* 2006. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization // Göttinger Geographische Abhandlungen. Vol. 115. P. 13-27.
- Carlson T.* 2007. An Overview of the “Triangle Method” for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery // Sensors. Vol. 7. P. 1612-1629.
- Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B., Tarantola S.* 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. Theoretical approach // Remote Sensing of Environment. Vol. 82. P. 188-197.
- Dobson M.C., Ulaby F.T.* 1985. Active microwave soil moisture research // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. GE-24. No. 1. P. 23-36.
- Escorihuela M.J., Quintana-Seguí P.* 2016. Comparison of remote sensing and simulated soil moisture datasets in Mediterranean landscapes // Remote Sensing of Environment. Vol. 180. P. 99-114.
- Gao B.-C.* 1996. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. Vol. 58 (3). P. 257-266.
- Ghulam A., Li Z.-L., Qin Q., Yimit H., Wang J.* 2008. Estimating crop water stress with ETM+NIR and SWIR data // Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 148. P. 1679-1695.
- Gillon D., Dauriac F., Deshayes M., Valette J.C., Moro C.* 2004. Estimation of foliage moisture content using near infrared reflectance spectroscopy // Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 124. P. 51-62.
- Maki M., Ishiahrab M., Tamura M.* 2004. Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data // Remote Sensing of Environment. Vol. 90. P. 441-450.
- Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., Vidal A.* 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index // Remote Sensing of Environment. Vol. 49. P. 246-263.
- Nijland W., Coops N.C., Macdonald S.E., Nielsen S.E., Bater C.W., White B., Ogilvie J., Stadt J.* 2015. Remote sensing proxies of productivity and moisture predict forest stand type and recovery rate following experimental harvest // Forest Ecology and Management. Vol. 357. P. 239-247.
- Peuelas J., Filella I., Biel C., Serrano L., Sav R.* 1993. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status // International Journal of Remote Sensing. Vol. 14 (10). P. 1887-1905.
- Sadeghi M., Babaeian E., Tuller M., Jones S.B.* 2017. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations // Remote Sensing of Environment. Vol. 198. P. 52-68.
- Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A.J.* 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review // Earth-Science Reviews. Vol. 99 (3-4). P. 125-161.
- Yebra M., Dennison P.E., Chuvieco E., Riaño D., Zylstra P., Hunt Jr. E.R., Danson F.M., Qi Y., Jurdao S.* 2013. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products // Remote Sensing of Environment. Vol. 136. P. 455-468.
- Wigneron J.-P., Chanzy A., Calvet J.-C., Bruguier N.* 1995. A Simple Algorithm to Retrieve Soil Moisture and Vegetation Biomass Using Passive Microwave Measurements over Crop Fields // Remote Sensing of Environment. Vol. 51. No. 3. P. 331-341.