Полевое тестирование метода картографического моделирования влагозапасов поверхностного слоя почвенного покрова, основанного на данных радарной съёмки Sentinel-1 и цифровой модели рельефа

А. М. Зейлигер¹, К. В. Музалевский², Е. В. Зинченко³, О. С. Ермолаева¹, В. В. Мелихов³

¹ Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, 127550, Россия E-mail: azeiliguer@mail.ru

² Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru

³ Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия Волгоград, 400002, Россия E-mail: zinchenko_ev@vniioz.ru

Влагосодержание поверхностного слоя почвенного покрова (ВПС-ПП) является одним из ключевых параметров, используемых для количественного описания гидрологического состояния поверхности почвы, а также при оценке доступности почвенной влаги растительному покрову. Поскольку коэффициент обратного радарного рассеяния чувствителен к влажности почвы, в настоящей работе применялись данные Sentinel-1 для картирования влажности почвы с высоким пространственным разрешением с целью отображения пространственных и временных закономерностей распределения почвенной влаги на уровне поля в практике управления почвенными и водными ресурсами. Прямые измерения ВПС-ПП толщиной 5 см были реализованы в результате проведённого полевого мониторинга на экспериментальном участке, расположенном на территории Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия (пос. Водный, Волгоградская обл.). В заданных координатах на тестовом участке были отобраны соответствующие почвенные образцы, влагосодержание которых было определено с использованием термостатно-весового метода. В результате создан первый точечный слой геоданных ВПС-ПП. По данным радарной съёмки Sentinel-1 была выполнена оценка ВПС-ПП для того же пространственного экстента экспериментального участка. Значения растрового набора значений влажности почвы по данным дистанционного зондирования (ВПС-ПП-ДЗЗ) в пределах границ экспериментального участка были рассчитаны по данным радарной съёмки Sentinel-1. Эти расчёты основаны на оценке отражательной способности почвы, полученной методом нейронной сети, и дальнейшего решения обратной задачи с использованием диэлектрической модели, учитывающей содержание глинистой фракции почвы тестового участка. В ходе тренировки нейронной сети использовались входные данные коэффициентов обратного радарного рассеяния, измеренные Sentinel-1 на согласованной вертикальной и перекрёстной поляризации, и выходное значение отражательной способности почвы, оценённое на основе точечного слоя геоданных ВПС-ПП и диэлектрической модели. Ортотрансформация снимка Sentinel-1 осуществлялась с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной в результате стереосъёмки, выполненной с использованием беспилотного летательного аппарата Phantom 4 Pro. В результате сравнения наборов геоданных ВПС-ПП и ВПС-ПП-Д33, полученных в ходе полевого мониторинга и дистанционного зондирования соответственно, были оценены значения коэффициента детерминации (0,948) и стандартного отклонения (2,04 %). Этот результат подтверждает удовлетворительную линейную корреляцию между наборами ВПС-ПП и ВПС-ПП-ДЗЗ. Сравнение двух полученных точечных слоёв геоданных ВПС-ПП указывает на удовлетворительное воспроизведение первого набора вторым. Такой вывод получен в результате наземного мониторинга и картографического моделирования, выполненного с помощью разработанного метода с использованием данных радарной съёмки Sentinel-1 и характеристик ЦМР. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что разработанный метод может рассматриваться в качестве научной и методологической основы новой технологии картографического мониторинга ВПС-ПП, которая рассматривается в настоящее время в качестве одной из основных базовых характеристик для использования в точном орошаемом земледелии.

Ключевые слова: почвенный покров, влажность почвы, точечные данные, растровые данные, гранулометрический состав, шероховатость земной поверхности, цифровая модель местности, БПЛА, радарная съёмка, Sentinel-1, обратное радарное рассеяние, нейронные сети, диэлектрическая модель почвы

> Одобрена к печати: 07.06.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-113-128

Введение

Влажность поверхностного слоя почвенного покрова (ВПС-ПП) Θ_{ss} является одной из ключевых динамических характеристик, которые используются в глобальных, региональных и локальных гидрологических моделях суши для моделирования динамики влагозапасов почвенного покрова и его корнеобитаемой части. Для оценки этой характеристики используются различные системы аэрокосмического и наземного мониторинга, позволяющие получать искомые данные с разным пространственным и временным разрешением (Музылев и др., 2017; Andreassian et al., 2006; Chen et al., 2005; Gowda et al., 2008; Moehrlen, 1999; Overgaard et al., 2006; Pitman, 2003; Startseva et al., 2014).

В настоящее время одним из наиболее перспективных инструментов для всепогодного космического мониторинга Θ_{ss}^{rs} с высоким пространственным разрешением стал радар спутника Sentinel-1. В отличие от радиометров инфракрасного диапазона микроволновое излучение этого радара в С-диапазоне частот (5,4 ГГц) не зависит от условий освещённости и неблагоприятных атмосферных явлений. Это позволяет проводить круглосуточный всепогодный мониторинг ВПС-ПП на основе радарных данных Sentinel-1. В отличие от современных радиометров спутников SMAP (англ. Soil Moisture Active Passive) и SMOS/MIRAS (англ. Soil Moisture and Ocean Salinity, Европейское космическое агентства, англ. European Space Agency — ESA; англ. Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) в L-диапазоне на частоте 1,4 ГГц (Entekhabi et al., 2014; Wigneron et al., 2017), GCOM-W1/AMSR2 в К- и Ка-диапазонах на частотах 19 и 37 ГГц (Gao et al., 2018), а также радара спутника MetOp/ASCAT в С-диапазоне на частоте 5,3 ГГц (Brocca et al., 2017), которые имеют низкое пространственное разрешение ~10 км, радар спутника Sentinel-1 обладает высоким пространственным разрешением ~10 м. Это позволяет использовать данные указанного радара для мониторинга ВПС-ПП на небольших по размерам участках земной поверхности, соизмеримых с территориями, занятыми сельскохозяйственными посевами, а также их квазиоднородными внутренними контурами.

В общем случае на территориях, занятых сельскохозяйственными посевами, ключевыми характеристиками, влияющими на коэффициент обратного радарного рассеивания (KOPP), который измеряется радаром спутника Sentinel-1 на фиксированном угле зондирования (29–46°), являются влажность подстилающего слоя и его шероховатость (Oh et al., 1992). В частном случае, когда земная поверхность подстилающего слоя лишена растительности, этими характеристиками становятся Θ_{ss} и шероховатость поверхности дневного слоя почвенного покрова (ШП-ПП). Обе эти характеристики изменяются во времени и пространстве, причём скорость изменений тесно связана как с характеристиками мезо- и макрорельефа, так и с характеристиками почвенного и растительного покрова. Драйверами изменений являются разнообразные природно-антропогенные воздействия на почвенный покров и растительный слой. Для сельскохозяйственных угодий такими драйверами выступают явления, провоцирующие водную и ветровую эрозию, а также сельскохозяйственная обработка земель и орошение посевов сельскохозяйственных культур, которое в ряде случаев провоцирует ирригационную эрозию.

Одним из способов представления ШП-ПП в существующих моделях радарного рассеяния стало использование статистических характеристик высоты точек поверхности почвенного покрова (ВТП ПП) $h_{\rm ss}$. Так, в широко используемых моделях (метод малых возмущений, физической и геометрической оптики, полуэмпирических моделей, интегральных уравнений

(МИУ) (Ulaby, Long, 2015)) в качестве входных параметров наравне с Θ_{ss} выступает среднеквадратическое отклонение $\sigma(h_{ss})$, а также длина корреляции и автокорреляционная функция распределения $F(h_{sc})$. При этом в работе (Davidson et al., 2000) было показано, что $\sigma(h_{sc})$, длина корреляции и вид $F(h_{ss})$ на сельскохозяйственных полях зависят не только от характеристик поверхности ПП, но и от длины профиля (0,5–25 м), в пределах которого производились из-мерения. В результате модельная оценка $\Theta_{ss}^{\prime s}$ по спутниковым радарным данным на основе существующих классических моделей рассеяния с использованием статистических параметров ШП-ПП, как правило, приводит к большому рассогласованию с данными полевых измерений (Baghdadi et al., 2004, 2011; Thoma et al., 2006; Wang et al., 2014). В последние годы для преодоления указанных ограничений наиболее широко применяются полуэмпирические подходы, основанные на использовании методов нейронных сетей. Такой подход, основанный на использовании широко известной модели рассеяния МИУ, в которой длина корреляции, являющаяся входным параметром, калибруется по значениям $\sigma(h_{sc})$ экспериментального участка, приведён в работе (Baghdadi et al., 2004). В результате применения этого подхода авторам удалось снизить погрешность апостериорной оценки КОРР в несколько раз, вплоть до 0,9–2,2 дБ. При этом в подобных моделях рассеяния в качестве одного из входных параметров используется диэлектрическая проницаемость ПП, значение которой рассчитывается на основе эмпирических и физических моделей диэлектрической проницаемости (Dobson et al., 1985; Hallikainen et al., 1985; Mironov et al., 2009; Zhang et al., 2020). Эмпирическая модель (Hallikainen et al., 1985) в качестве входных параметров использует Θ_{ss} и гранулометрический состав почвенного покрова f_{d} . Помимо входных параметров модели (Hallikainen et al., 1985), в полуэмпирической модели (Dobson et al., 1985) в качестве входных параметров используются характеристики поверхностного слоя ПП: а) плотность в сухом состоянии; б) плотность твёрдой фазы ПП; в) частота электромагнитной волны. Из известных диэлектрических моделей в диапазоне сверхвысоких частот (Mialon et al., 2017) наилучшие результаты показывает физическая модель, описанная в работе (Mironov et al., 2009), которая в настоящее время используется в штатном режиме в алгоритме спутников SMOS (Wigneron et al., 2017) и SMAP НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, англ. NASA — National Aeronautics and Space Administration) (Zeng et al., 2016) для глобального мониторинга влажности ПП Земли. Эта модель позволяет рассчитать комплексную диэлектрическую проницаемость почв с содержанием глинистой фракции f_{clav} (размер почвенных частиц <0,002 мм по классификации USDA (United States Department of Agriculture, Министерство сельского хозяйства США)) в зависимости от объёмной влажности Θ_{ss} и частоты электромагнитного поля в интервале 45 МГц-26,5 ГГц при температурах 20-22 °С. Соответствующую верификацию эта модель прошла на наборе данных 15 типов почв, содержание частиц илистой фракции которых варьировало в диапазоне 0–76 %.

В последние годы наибольший прогресс в развитии полуэмпирических подходов, основанных на применении нейронных сетей, достигнут для сочетания физической модели МИУ с нейронной сетью, которая используется для расчёта Θ_{ss}^{rs} по значениям KOPP (Mirsoleimani et al., 2019). Использование радарных данных Sentinel-1 на вертикально-вертикальной (VV) поляризации и нейронных сетей с двумя скрытыми слоями и 20 нейронами позволило апостериорно оценить КОРР с погрешностью 0,8 дБ и в результате рассчитать Θ_{ss}^{rs} сельскохозяйственных земель, непокрытых растительностью, с погрешностью порядка 0,03 см³·см⁻³ (Mirsoleimani et al., 2019). В случае сельскохозяйственных угодий, покрытых растительностью, с NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) не более 0,75 и $\sigma(h_{ss})$ в пределах 1–3 см погрешность апостериорной оценки Θ_{ss}^{rs} возрастает до 0,05 см³ см⁻³ как с использованием одной поляризации VV, так и пары поляризаций VV и VH (вертикально-горизонтальная) (El Hajj et al., 2017). Аналогичные результаты были получены в работе (El Hajj et al., 2016) для радара Х-диапазона с использованием как одной поляризации НН (горизонтально-горизонтальная), так и пары поляризаций HH-VV. Несмотря на значительную трудоёмкость соответствующих алгоритмов решения обратных задач в случаях больших объёмов радарных данных при комбинировании полуэмпирических методов и нейронных сетей для целей мониторинга Θ_{ss}^{rs} , достигнутые положительные результаты свидетельствуют о значительных перспективах этой методики. Так, в работе (Paloscia et al., 2008) на основе данных спутникового радара Envisat/ASAR (поляризации HH и HV (горизонтально-вертикальная)) в С-диапазоне для нескольких тестовых полей на севере Италии продемонстрирован эффективный алгоритм, основанный на нейронной сети прямого распространения, для апостериорной оценки Θ_{ss}^{rs} . При использовании разработанной методики были получены результаты со среднеквадратической погрешностью 2,2–2,8 % и коэффициентом детерминации $r^2 = 0,85-0,91$ относительно набора данных Θ_{ss}^{gr} , полученных с применением инвазивного метода измерения. Аналогичный подход с использованием радарных данных Sentinel-1, Radarsat, Envisat был применён для тестовых участков, расположенных на сельскохозяйственных землях Италии, Австралии и Испании (Paloscia et al., 2013), а также Туниса (Hachani et al., 2019). В результате его применения отклонения апостериорных оценок по радарным данным Θ_{ss}^{rs} от наземных данных Θ_{ss}^{gr} мониторинга лежали в пределах 0,02-0,05 см³⁻см⁻³. Таким образом, было показано, что применение в качестве входного параметра нейронной сети для модельной оценки КОРР, измеренной на паре VH- и VV-поляризаций, позволяет учесть как характеристики шероховатости ПП, так и растительного покрова.

Объект исследований

Экспериментальный участок, на котором проводились исследования по тестированию разработанного метода апостериорной оценки Θ_{ss} , расположен на территории опытно-производственного хозяйства (ОПХ) Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия (ВНИИОЗ), находящегося вблизи пос. Водный, Волгоградской обл.



Рис. 1. Экспериментальный участок, расположенный на полях ВНИИОЗ: *а* — космический снимок Sentinel-2 (красными точками обозначены места отбора почвенных образцов); *б* — наземный снимок экспериментального участка



Рис. 2. Картограмма индекса NDVI экспериментального участка, рассчитанная на основе снимка Sentinel-2 от 21.08.2019

Координаты центра этого участка 48,60367° с. ш., 44,15659° в. д. соответствуют пересечению линий A–B и A1–B1 (*puc. 1a*, см. с. 116), где они отображены поверх снимка Sentinel-2 от 20.08.2019 в видимом диапазоне. Сам участок расположен на относительно ровном поперечном склоне, имеющим уклон в направлении с севера на юг (вдоль линии А–В) порядка 2 %. Непосредственно на момент пролёта спутника Sentinel-1 (20.08.2019) и подспутникового наземного мониторинга Θ^{gr}_{ss} одна часть этого участка, расположенная между его серединой и северной границей, была частично покрыта редкими незапаханными растениями люцерны, незначительно покрывавшими поверхность почвы, а его вторая часть, расположенная между серединой и южной границей экспериментального участка, была практически голой (рис. 16). При этом, как показано на наземном снимке, представленном на *рис. 16*, поверхность ПП в месте проведения эксперимента имела достаточно хорошо выраженный микрорельеф, который был сформирован в результате запахивания поперёк склона посева орошаемой люцерны незадолго до проведения подспутникового мониторинга. Указанное различие в покрытии ПП остатками посева люцерны подтверждается рассчитанными по данным Sentinel-2 и группировки спутников Planet значениями NDVI (*puc. 2*, см. с. 116). Так, для северной части значения этого индекса находились в пределах 0,176±0,022, а для южной составляли 0,103±0,007.

Методика проведения экспериментов

Методика проведения экспериментов по тестированию разработанного способа апостериорной оценки Θ_{ss} состояла из двух частей. Первая часть — наземная — была сфокусирована на получении набора одномоментных геореференцированных данных Θ_{ss}^{gr} и гранулометрического состава дневного слоя ПП, а также характеристик шероховатости поверхности дневного слоя ПП. Вторая часть — компьютерная — была направлена на разработку алгоритма, отладку и тестирование инструментов по обработке исходных данных наземного мониторинга и радарной съёмки, а также итоговый расчёт апостериорной оценки объёмной влажности дневного слоя ПП на основе данных дистанционного зондирования Θ_{ss}^{rs} .

Методика проведения наземных исследований

Наземная полевая часть экспериментальных работ состояла в получении наборов данных характеристик рельефа и отборе Θ_{ss}^{gr} для двух маршрутов мониторинга № 1 и 2, показанных на *рис. 1а* и 2. Первый из двух маршрутов начинался на южной границе экспериментального участка и по косой линии шёл к северной границе, после чего менял направление к южной границе участка. Второй маршрут являлся зеркальным отражением первого и, соответственно, начинался и заканчивался на северной границе этого участка. Пространственная конфигурация маршрутов мониторинга была спланирована и реализована с целью оптимального охвата полевым мониторингом различных элементов рельефа экспериментального участка.

Для оценки характеристик рельефа вдоль обоих маршрутов мониторинга была проведена стереоскопическая видеосъёмка экспериментального участка с борта беспилотного летательного аппарата (БПЛА) марки Dji Phantom 4 Pro его штатной камерой. В результате обработки полученных цифровых видеоданных в программном обеспечении Agisoft PhotoScan была создана цифровая модель рельефа (ЦМР), привязанная к геореференцированным с субсантиметровым разрешением центрам опоточек и соответствующих дифференцированных поправок. По данным ЦМР были построены профили h_{ss} высоты дневной поверхности ПП (*рис. 3*, см. с. 118), соответствующие трём линиям А–В, А1–В1 и А2–В2, плановое расположение которых представлено выше на *рис. 16*. Вдоль маршрутов мониторинга были рассчитаны $\sigma(h_{ss})$ дневной поверхности ПП (*рис. 4*, см. с. 118) на квадратных участках поверхности почвы, центры которых совпадали с точками отбора почвенных образцов (см. *рис. 1a*).

Центральная часть маршрута № 1 имеет статистически более шероховатую поверхность по сравнению с центральной частью маршрута № 2 (см. *рис. 4*). Кроме того, на *рис. 4* видно,







Рис. 3. Профили высот дневной поверхности ПП по линиям А-В, А1-В1 и А2-В2

Рис. 4. Профили высот отметок дневной поверхности ПП ($\sigma(h_{sc})$) по линиям маршрутов мониторинга № 1 и 2

Высокая плотность поверхностного слоя ПП не позволила использовать для мониторинга Θ_{ss}^{gr} инвазивные приборы, измерения которых основаны на косвенных методах. В связи с этим была применена методика, основанная на отборе и анализе ненарушенных почвенных образцов из слоя 0–5 см в точках.

Места отбора образцов вдоль проложенных маршрутов выбирались на основе визуального анализа мезорельефа дневной поверхности ПП с тем, чтобы они располагались в центре репрезентативных участков размерами порядка 1–2 м. Для удобства цифровой фиксации, а также последующей интерпретации результатов полевого мониторинга в программной среде ArcGIS Online было разработано специальное мобильное приложение с набором необходимых вкладок и инструментов для сбора первичных данных и их передачи посредством мобильной связи в базу данных, реализованную в указанном облачном геосервисе. Основными собираемыми данными стали: а) день и время отбора почвенных образцов; б) координаты мест обора образцов; в) номера бюкс, в которые отбирались почвенные образцы; г) видеоизображения композиции мест отбора почвенных образцов и соответствующих почвенных бюкс с нанесёнными на них номерами. Указанная процедура позволила существенно упростить методику проведения полевого мониторинга и обработку лабораторных измерений, а также заключительную картографическую интерпретацию полученных результатов. В целом разработанный регламент полевого мониторинга позволил автоматизировать процесс заполнения слоёв базы геоданных, а также проводить отбор проб почв в запланированных точках, используя для этого заранее подготовленный шаблон.

Непосредственно отбор ненарушенных образцов почв проводился с помощью пробоотборника и почвенных цилиндрических бюкс высотой 5 см с режущей кромкой производства нидерландской фирмы Eijkelkamp. С помощью этого пробоотборника проводилось вертикальное заглубление почвенного бюкса в ПП. В момент, когда верх бюкса оказывался на уровне дневной поверхности ПП, он вместе с почвенным образцом, заполнившим его внутренний объём, извлекался, а обе его открытые грани герметично закрывались штатными мягкими пластиковыми крышками. Последующее определение плотности отобранных образцов и их влажности проводилось в почвенной лаборатории ВНИИОЗ с использованием стандартного термостатно-весового метода. В результате наземного мониторинга, проведённого 20.08.2019 на экспериментальном участке ОПХ ВНИИОЗ площадью порядка 2 га, по описанной выше методике в 46 точках обоих маршрутов № 1 и 2 (см. *рис. 1а и 2*) были получены наборы наземных данных Θ_{sr}^{gr} .

Метод апостериорной оценки влажности ПП по геоданным радарной съёмки Sentinel-1 с использованием нейронной сети

Для территории экспериментального участка измерение значений КОРР (σ_{VV} , σ_{VH}) на VV- и VH-поляризациях проводилось 20 августа 2019 г. радаром спутника Sentinel-1A на частоте 5,4 ГГц в интерферометрическом широкополосном режиме (IW GRD-амплитудные изображения, спроецированные на поверхность земли с использованием модели эллипсоида Земли) (IW – *англ*. Interferometric Wide Swath; GRD – *англ*. ground range detected) с пространственным разрешением ~10 м. Эти данные в стандартном формате (Standard Archive Format for Europe – SAFE) были получены из центра данных Европейского космического агентства (Copernicus Open Access Hub, https://scihub.copernicus.eu) и обработаны в программном обеспечении ESA SNAP.

Разработанный метод апостериорной оценки Θ_{ss}^{rs} по данным дистанционного зондирования основан на применении нейронной сети с одним выходным параметром — коэффициентом отражения волны от ПП (в надир) по мощности $\Gamma_0(\Theta_{ss}, f_{clay})$, где f_{clay} — содержание глини-стой фракции, и двумя входными значениями КОРР (σ_{VV}, σ_{VH}). В настоящей работе была выбрана простейшая нейронная сеть (HC) прямого распространения (англ. feed forward), состоящая из 1-4 скрытых слоёв, в каждом из которых было от 1 до 30 нейронов. Моделирование нейронной сети выполнялось в среде программного обеспечения MatLab. Для тренировки НС использовалось 32 пары входных значений (σ_{VV} , σ_{VH}) и 32 значения $\Gamma_0(\Theta_{ss}, f_{clav})$. Входные и выходные значения формировались случайным образом из 46 значений набора $\sigma_{VV}, \sigma_{VH}, \Gamma_0(\Theta_{ss}, f_{clay})$, соответствовавших локациям отбора почвенных проб (см. *рис. la* и 2). Значения $\Gamma_0(\Theta_{ss}, f_{clav})$ рассчитывались по формуле Френеля с использованием диэлектрической модели (Mironov et al., 2009) при содержании глинистой фракции $f_{clay} = 35 \%$ и массива геоданных Θ_{ss}^{gr} , измеренных термостатно-весовым способом в местах отбора проб (см. *рис. 1а* и 2). В процессе тренировки HC по минимизации среднеквадратических отклоне-ний между выходными значениями Γ_0^N , рассчитываемых HC, и рассчитанными $\Gamma_0\left[\Theta_{ss}^{gr}, f_{clay}\right]$ с использованием массива геоданных Θ_{ss}^{gr} использовался стандартный алгоритм Левенберга – Макварда. Окончательно искомая влажность почвы ПП Θ_{ss}^{rs} рассчитывалась в ходе решения обратной задачи по минимизации нормы невязки между предсказанными нейронной се-тью значениями Γ_0^N и рассчитанными $\Gamma_0\left(\Theta_{ss}^r, f_{clay}\right)$ на основе формулы Френеля и диэлек-трической модели (Mironov et al., 2009). Даная задача минимизации решалась на основе алгоритма Левенберга-Макварда. Предложенная методика апостериорной оценки влажности ПП схематично представлена на рис. 5.



Рис. 5. Простая нейронная сеть прямого распространения с N скрытыми слоями

Общее тестирование HC и метода апостериорной оценки Θ_{ss}^{rs} по схеме, представленной на *рис. 5*, показало, что увеличение числа используемых нейронов с 1 до 12 в каждом из срытых слоёв HC приводит к возрастанию коэффициента детерминации (R^2) и уменьшению среднеквадратического отклонения ($\Delta \Theta_{ss}^{rs}$) между оцениваемыми значениями Θ_{ss}^{rs} и измеренными значениями Θ_{ss}^{gr} (*рис. 6*, см. с. 120). При этом использование больше двух скрытых слоёв не приводит к дальнейшему росту точности оценок HC.



Рис. 6. Результаты компьютерных экспериментов с нейронной сетью: a — зависимость коэффициента детерминации между предсказанным нейронной сетью Γ_0^N и рассчитанным значением $\Gamma_0\left[\Theta_{ss}^{gr}, f_{clay}\right]$ от количества нейронов, используемых в скрытых слоях, число которых варьировало в пределах от 1 до 4; $\delta - \Delta \Theta_{ss}^{rs}$ при апостериорной оценке значений Θ_{ss}^{rs} в зависимости от количества нейронов, используемых в скрытых слоях варьировало в пределах от 1 до 4; $\delta - \Delta \Theta_{ss}^{rs}$ при апостериорной оценке значений Θ_{ss}^{rs} в зависимости от количества нейронов, используемых в скрытых слоях, число которых варьировало в пределах от 1 до 4



Рис. 7. Рассчитанные Θ_{ss}^{gr} в местах отбора почвенных образцов и измеренные Θ_{ss}^{rs} : *а* — вдоль маршрута № 1; *б* — вдоль маршрута № 2

Проведённые компьютерные эксперименты с HC для различных пар комбинаций входных данных: $q = \sigma_{VH} / \sigma_{VV}$, σ_{VV} , σ_{VV} , σ_{VV} , $\sigma_{VV} = 0$ показали, что наибольшее значение коэффициента детерминации между Γ_0^N и $\Gamma_0 \left(\Theta_{ss}^{gr}, f_{clay}\right)$ наблюдается при использовании в качестве двух входных величин σ_{VV} и σ_{VH} в нейронной сети (см. *рис. 5*). В результате в качестве рабочего варианта нами была выбрана HC, состоящая из двух скрытых слоёв по 12 нейронов в каждом, что позволило оценить значения Θ_{ss}^{rs} для всех 46 точек в местах отбора почвенных образцов на тестовом участке с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,948$ и $\Delta\Theta_{ss}^{rs} = 2,04\%$ (*puc. 7*).

Обсуждение и анализ результатов

Выше было отмечено, что планирование маршрутов наземного мониторинга преследовало цель получения наземных данных Θ_{ss}^{gr} на относительно однородном участке в местах с различными характеристиками мезорельефа дневной поверхности ПП.

В результате полевого мониторинга был получен массив геоданных, одна часть которого была приурочена к участку блюдцеобразного замкнутого мезопонижения, а другая расположена на его водосборной части. При этом ожидалось, что значения Θ_{ss}^{gr} в мезопонижении будут несколько выше соответствующих значений на водосборной части ввиду проведённого ранее полива дождевальной машиной. В целом это предположение нашло своё отражение в результатах проведённого мониторинга, которые представлены в виде профилей Θ_{ss}^{gr} (*puc. 8*), где в качестве значений оси абсциссы использованы номера точек мест отбора почвенных образцов по обоим маршрутам № 1 и 2.



Рис. 8. Профили Θ_{ss}^{gr} маршрутов № 1 и 2 на момент полевого мониторинга 20.08.2019

Визуальный анализ профилей влажности по маршрутам № 1 и 2, представленных на *рис. 8*, показывает относительную схожесть соответствующих значений Θ_{ss}^{gr} в их начале и конце, а также существенную разницу этих значений в средних частях обоих маршрутов. Отмеченное расхождение, очевидно, связано с прохождением середины маршрута № 2 через отмеченное выше мезопонижение, в котором в результате поверхностного стока, вызванного проведённым дождеванием, отмечалось скопление невпитавшейся на территории вышера-сположенного мезоводосбора поливной воды.

Анализ результатов, приведённых на *рис.* 7 и 8, показывает достаточно хорошую сопоставимость данных Θ_{ss}^{gr} и Θ_{ss}^{rs} в областях с их высокими значениями, соответствующими в случае маршрута № 2 области отмеченного блюдцеобразного мезопонижения, и несколько худшую — для более сухого поверхностного слоя ПП на вышерасположенных участках. Указанные различия могут быть объяснены более высокой степенью однородности поверхностного слоя ПП в пониженных местах и, соответственно, более высокой степенью его неоднородности в местах с более высокими отметками земной поверхности.

Полученный в результате компьютерных экспериментов оптимальный вариант нейронной сети был использован для оценки Θ_{ss}^{rs} на всём пространственном экстенте экспериментального участка (*puc. 9*, см. с. 122). Представленная на рисунке картограмма апостериорной оценки Θ_{ss}^{rs} в целом соответствует пространственному распределению Θ_{ss}^{gr} в местах отбора проб почв при наземном подспутниковом мониторинге. В частности, это наглядно характеризуется синхронными различиями значений обоих массивов геоданных Θ_{ss} в зоне мезопонижения и мезоводосбора на пересечении линий профилей A–B и A1–B1.

Проведённый поляриметрический анализ на основе H-α-разложения с использованием комплексных изображений тестового участка на двух поляризациях VH и VV выявил однократное рассеяние волны шероховатой поверхностью ПП между 6-й и 17-й точками маршрута № 2 включительно, которые соответствуют расположению блюдцеобразного мезопонижения, а также начальными и конечными точкам маршрута № 1 (*рис. 10*, см. с. 122, зоны Z9 и Z6 со значением энтропии ~0,5). Поляриметрический анализ был проведён на основе Н- α -разложения для двух поляризаций VV и VH в соответствии с работой (Cloude, 2007). Отмеченные результаты этого анализа хорошо согласуются с высокими значениями статистических характеристик шероховатости дневной поверхности ПП соответствующих участков на обоих маршрутах (см. *puc. 4*), а также с представленным изображением экспериментального участка (см. *puc. 1а*). При этом можно отметить, что поверхностный слой блюдцеобразного мезопонижения сформирован тонкими почвенными частицами, нанесёнными туда с соответствующих мезоводосборов в результате формирования поверхностного стока невпитавшейся дождевой и поливной воды.



Рис. 9. Картограмма Θ_{ss}^{rs} тестового участка, рассчитанная по радарным данным Sentinel-1 на основе созданного алгоритма с использованием нейронной сети



Puc. 10. Характеристика тестового участка на основе Н-α-разложения. Сплошной линей обозначена граница физически значимых результатов Н-α-разложения в соответствии с работой (Cloude, 2007)

Другие места расположения точек отбора почвенных образцов характеризуются большими значениями угла α и энтропии, что свидетельствует о преимущественном однократном диффузном рассеянии за счёт хаотического влияния элементов дневной поверхности ПП и растительного покрова. Дополнительное рассеивающее влияние (см. *рис. 10*, энтропия >0,5) растительного покрова наблюдается практически для всех точек маршрута № 1 и на оконечных точках маршрута № 2, которые преимущественно расположены на северных участках поля, частично покрытых незапаханными растениями люцерны. Кроме того, можно отметить, что наибольшая погрешность при апостериорной оценке Θ_{ss}^{rs} нейронной сетью (см. *puc.* 7) наблюдается для тех точек маршрутов, которые преимущественно статистически завышены на фоне средних значений отметок высоты дневной поверхности ПП (см. *puc.* 4) и при этом расположены в зоне Z6 (см. *puc.* 10).

Анализ данных, представленных на *puc.* 7, показывает, что в области значений Θ_{ss}^{gr} в пределах 4–13 % (где наблюдается наибольшая дисперсия) статистически больше точек, расположенных на участках маршрута с повышенными значениями шероховатости ПП (2–4 см) (см. *puc.* 4). А при высоких значениях $\Theta_{ss}^{rs} > 14$ % точки отбора почв располагались на участках маршрута со средней шероховатостью ПП (<1,5 см). Это обстоятельство позволяет сделать следующий вывод: в областях, характеризующихся средней шероховатостью и большими значениями Θ_{ss}^{gr} ПП, нейронная сеть с высокой степенью достоверности позволяет описать статистические свойства распределения высоты отметок ПП, а также зависимость КОРР от Θ_{ss}^{gr} . В случае малых значений $\Theta_{ss}^{gr} < 14$ % и больших значений отметок высот дневной поверхности ПП необходим дополнительный параметр, независимо характеризующий статистические свойства $\sigma(h_{ss})$ отметок высот ПП, для уменьшения дисперсии оцениваемых в этой области значений Θ_{ss}^{rs} . Таким дополнительным параметром могут быть значения $\sigma(h_{ss})$ отметок высоты дневной поверхности ПП, оцениваемые на тестовом участке с использованием БПЛА в день пролёта Sentinel-1.

Заключение

В настоящей работе впервые исследовалась возможность применения нейронных сетей для обработки данных радарной съёмки спутника Sentinel-1 для целей мониторинга пространственного распределения влажности поверхностного слоя почвенного покрова на экспериментальном участке, расположенном на сельскохозяйственных землях Волгоградской обл. Особенность предложенного подхода заключается в применении нейронной сети для расчёта отражательной способности дневной поверхности почвенного покрова с последующим простым алгоритмом инверсии отражательной способности в значения влажности этого слоя с использованием диэлектрической модели, учитывающей гранулометрический состав. На основе радарных данных Sentinel-1 предложенная нейронная сеть, состоящая из двух скрытых слоёв по 12 нейронов, позволила с коэффициентом детерминации 0,948 и среднеквадратическим отклонением ~2 % апостериорно оценить пространственно-распределённую влажность поверхностного слоя почвенного покрова тестового участка, а также провести сравнение рассчитанных данных с влажностью почвы, измеренной термостатно-весовым методом, в местах отбора почвенных образцов. Разработанная методика была протестирована как для участков, лишённых растительности, так и для зон с редкой растительностью люцерны.

Авторы полагают, что разработанный метод позволит с полученной достоверностью, составившей ~2 % абсолютных значений объёмной влажности, проводить апостериорную оценку этого параметра при значениях >14 % на сельскохозяйственных полях, среднеквадратическое отклонение отметок высоты дневной поверхности почвенного покрова которых составит ~1,5 см. Для сельскохозяйственных полей, характеризующихся значениями среднеквадратического отклонения отметок высоты дневной поверхности почвенного покрова которых составит ~1,5 см. Для сельскохозяйственных полей, характеризующихся значениями среднеквадратического отклонения отметок высоты дневной поверхности почвенного покрова >2 см и объёмной влажностью <14 %, необходимо проводить совершенствование методики с целью минимизации погрешностей. Один из таких способов — введение дополнительного параметра, отражающего дисперсию высоты отметок дневной поверхности почвенного по-крова, который может быть измерен на тестовом участке с использованием БПЛА в день пролёта Sentinel-1. Авторы планируют проведение дальнейших экспериментов, направленных на валидацию предложенного подхода для случаев почвенного покрова с разнообразным гранулометрическим составом поверхностного слоя, а также составом произрастающих на нём сельскохозяйственных культур в течение ряда вегетационных стадий развития.

Исследование выполнено в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-29-05261 мк «Картографическое моделирование влагозапасов почвенного покрова на основе комплексной геофизической влагометрии для целей цифрового орошаемого земледелия».

Литература

- 1. Музылев Е. Л., Старцева З. П., Успенский А. Б., Волкова Е. В., Василенко Е. В., Кухарский А. В., Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. Использование данных дистанционного зондирования для моделирования водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 108–136. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136.
- Andreassian V., Bergström S., Chahinian N., Duan Q., Gusev Y. M., Litllewood I., Machevet T., Michel C., Montanary A., Moretti G, Moussa R, Nasonova O. N., O'Connor K., Paquet E., Perrin C, Rousseau A., Schaake J., Wagener T., Xie Z. Catalogue of the models used in MOPEX 2004/2005 // Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment – MOPEX / eds. Andreassian V., Hall A., Chahinian N., Shaake J. IAHS Publ., 2006. No. 307. P. 41–93.
- 3. *Baghdadi N., Gherboudj I., Zribi M., Sahebi M., Bonn F., King C.* Semi-empirical calibration of the IEM backscattering model using radar images and moisture and roughness field measurements // Intern. J. Remote Sensing. 2004. V. 25. P. 3593–3623.
- 4. *Baghdadi N., Saba E., Aubert M., Zribi M., Baup F.* Comparison between backscattered TerraSAR signals and simulations from the radar backscattering models IEM, Oh, and Dubois // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2011. V. 8. P. 1160–1164.
- Brocca L., Crow W. T., Ciabatta L., Massari C., de Rosnay P., Enenkel M. A Review of the Applications of ASCAT Soil Moisture Products // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2017. V. 10. No. 5. P. 2285–2306.
- 6. *Chen J. M., Chen X., Ju W., Geng X.* Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs // J. Hydrology. 2005. V. 305. No. 1. P. 15–39.
- Cloude S. The dual polarisation entropy/alpha decomposition: a PALSAR case study // Proc. 3rd Intern. Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry (POLinSAR 2007). Frascati, Italy. 22–26 Jan. 2007. P. 1–6.
- 8. *Davidson M. W.J., Le Toan T., Mattia F., Satalino G., Manninen T., Borgeaud M.* On the characterization of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2000. V. 38. No. 2. P. 630–640.
- Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T., El-rayes M. A. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil Part II: Dielectric Mixing Models // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1985. V. GE-23. No. 1. P. 35–46.
- El Hajj M., Baghdadi N., Zribi M., Belaud G., Cheviron B., Courault D., Charron F. Soil moisture retrieval over irrigated grassland using X-band SAR data // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 176. P. 202–218.
- 11. *El Hajj M., Baghdadi N., Zribi M., Bazzi H.* Synergic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Images for Operational Soil Moisture Mapping at High Spatial Resolution over Agricultural Areas // Remote Sensing. 2017. V. 9. P. 1292.
- Entekhabi D., Yueh S., O'Neill P., Kellogg K., Allen A., Bindlish R., Brown M., Chan S., Colliander A., Crlow W. T., Das N., De Lannoy G., Dunbar R. S., Edelstein W. N., Entin J. K., Escobar V., Goodman Sh. D., Jackson Th. J., Jai B., Johnson J., Kim E., Kim S., Kimball J., Koster R. D., Leon A., McDonald K. C., Moghaddam M., Mohammed P., Moran S., Njoku E. G., Piepmeier J. R., Reichle R., Rogez F., Shi J. C., Spencer M. W., Thruman S. W., Tsang L., Van Zyl J., Weiss B., West R. SMAP Handbook: Soil Moisture Active Passive. Mapping Soil Moisture and Freeze/Thaw from Space / California Institute of Technology. Pasadena, CA, USA. Jet Propulsion Lab., 2014. 192 p.
- 13. *Gao H., Zhang W., Chen H.* An Improved Algorithm for Discriminating Soil Freezing and Thawing Using AMSR-E and AMSR2 Soil Moisture Products // Remote Sensing. 2018. V. 10(1697). P. 1–17.
- 14. *Gowda P.H.*, *Chavez J.L.*, *Colaizzi P.D.*, *Evette S. R.*, *Howell T.A.*, *Tolk J.A.* ET mapping for agricultural water management: present status and challenges // Irrigation Science. 2008. V. 26. P. 223–237.
- Hachani A., Ouessar M., Paloscia S., Santi E., Pettinato S. Soil moisture retrieval from Sentinel-1 acquisitions in an arid environment in Tunisia: application of Artificial Neural Networks techniques // Intern. J. Remote Sensing. 2019. V. 40(24). P. 9159–9180.
- Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. C., El-rayes M.A., Wu L. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – Part 1: Empirical Models and Experimental Observations // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1985. V. GE-23. No. 1. P. 25–34.

- 17. *Mialon A.*, *Parrens M.*, *Richaume P.*, *Delwart S.*, *Kerr Y.* Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS and SMAP soil moisture retrieval algorithms // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 192. P. 238–262.
- 18. *Mironov V.L., Kosolapova L.G., Fomin S.V.* Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2009. V. 47. No. 7. P. 2059–2070.
- Mirsoleimani H. R., Sahebi M. R., Baghdadi N., El Hajj M. Bare Soil Surface Moisture Retrieval from Sentinel-1 SAR Data Based on the Calibrated IEM and Dubois Models Using Neural Networks // Sensors. 2019. V. 19. P. 3209.
- 20. *Moehrlen C*. Literature review of current used SVAT models: Internal Report 04-99. Cork, Ireland: Univ. College, Department of Civil and Environmental Engineering, 1999. 22 p.
- 21. *Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T.* An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1992. V. 30. No. 2. P. 370–381.
- 22. Overgaard J., Rosbjerg D., Butts M. B. Land-surface modeling in hydrological perspective a review // Biogeosciences. 2006. V. 3. P. 229–241.
- 23. *Paloscia S., Pampaloni P., Pettinato S., Santi E.* A comparison of algorithms for retrieving soil moisture from Envisat/ASAR images // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. P. 3274–3284.
- Paloscia S., Pettinato S., Santi E., Notarnicola C., Pasolli L., Reppucci A. Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 134. P. 234–248.
- 25. *Pitman A. J.* The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models // Intern. J. Climatology. 2003. V. 3. P. 479–510.
- 26. *Startseva Z.*, *Muzylev E.*, *Volkova E.*, *Uspensky A.*, *Uspensky S.* Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data // Intern. J. Remote Sensing. 2014. V. 35. No. 15. P. 5775–5799.
- 27. Thoma D., Moran M., Bryant R., Rahman M., Holifield-Collins C., Skirvin S., Sano E., Slocum K. Comparison of four models to determine surface soil moisture from C-band radar imagery in a sparsely vegetated semiarid landscape // Water Resources Research. 2006. V. 42. P. 1–12.
- 28. *Ulaby F., Long D.* Microwave radar and radiometric remote sensing. Norwood, MA: Artech House, 2015. 1014 p.
- 29. Wang H., Méric S, Allain S., Pottier E. Adaptation of Oh Model for soil parameters retrieval using multiangular Radarsat-2 datasets // J. Surveying and Mapping Engineering. 2014. V. 2. P. 65–74.
- Wigneron J.-P., Jackson T.J., O'Neill P., De Lannoy G., de Rosnay P., Walker J. P., Ferrazzoli P., Mironov V., Bircher S., Grant J. P., Kurum M., Schwank M., Munoz-Sabater J., Das N., Royer A., Al-Yaari A., Al Bitar A., Fernandez-Moran R., Lawrence H. Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS and SMAP soil moisture retrieval algorithms // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 192. P. 238–262.
- 31. Zeng J., Chen K. S., Bi H., Chen Q. A Preliminary Evaluation of the SMAP Radiometer Soil Moisture Product Over United States and Europe Using Ground-Based Measurements // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2016. V. 54. No. 8. P. 4929–4940.
- 32. Zhang L., Meng Q., Hu D., Zhang Y., Yao S., Chen X. Comparison of different soil dielectric models for microwave soil moisture retrievals // Intern. J. Remote Sensing. 2020. V. 41. No. 8. P. 3054–3069.

Field testing of the cartographic modeling of soil water content of the surface layer of soil cover based on Sentinel-1 radar survey and digital elevation model

A. M. Zeyliger¹, K. V. Muzalevskiy², E. B. Zinchenko³, O. S. Ermolaeva¹, V. V. Melikhov³

 ¹ Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy Moscow 127550, Russia E-mail: azeiliguer@mail.ru
² Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru
³ All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture

Volgograd 400002, Russia

E-mail: zinchenko_ev@vniioz.ru

The surface moisture content (SMC) is one of the key parameters, which is used for the quantitative description of soil hydrological state as well as the estimation of soil water availability to vegetation canopy. Since the radar backscattering coefficient is sensitive to SMC, in this investigation Sentinel-1 data was used for soil moisture mapping with a high spatial resolution, based on which the spatial and temporal patterns of soil moisture distribution at field level was mapped for implementing in the management of soil and water resources. Direct measurements of SMC in a layer thickness of 5 cm were carried out during field monitoring at an experimental test site, located on the territory of the All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture (Vodny village, Volgograd region). In the given coordinates on the test site, soil samples were taken, the moisture content of which was determined using the thermostat-weight method. As a result, the first point georeferenced layer of SMC was created. At the same time, the estimation of SMC based on Sentinel-1 radar observations was performed for the same spatial extent of the test site. The raster set of SMC within the boundaries of the test site was calculated from the Sentinel-1 remote sensing (RS) observations. This layer will be named SMC-RS. These calculations were based on the assessment of soil reflectivity obtained by neural network (NN) method and the further solution of the inverse problem using a dielectric model, which takes into account the soil clay content at the test site. During the training of the NN, backscatter coefficients measured by Sentinel-1 at co- and cross-polarization were used as input data. As the output data of the NN, the value of soil reflectivity, which was estimated based on point georeferenced layer of SMC and a dielectric model were used. Terrain correction of Sentinel-1 image was carried out using a digital elevation model (DEM), created by Phantom 4 Pro unmanned aerial vehicle as the result of stereo photography. As a result of comparing the georeferenced data sets SMC and SMC-RS obtained during field monitoring and remote sensing, respectively, the following values of determination coefficient (0.948) and standard deviation (2.04 %) were estimated. This result confirms a satisfactory linear correlation between both data sets. The comparison of the two layers of point georeferenced data sets indicates that the first set is well correlated by the second. This conclusion was obtained as the result of ground monitoring and cartographic modelling carried out using the developed method, Sentinel-1 observation and DEM. The developed method can be considered as the scientific and methodological basis of the new technology for the cartographic monitoring of SMC, which is currently treated as one of the main basic characteristics to be used in precision irrigated agriculture.

Keywords: soil cover, soil moisture, point data, raster data, particle size distribution, surface roughness, digital terrain model, UAV, radar imaging, Sentinel-1, radar backscatter, neural networks, dielectric soil model

Accepted: 07.06.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-113-128

References

1. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspenskiy A. B., Volkova E. V., Vasilenko E. V., Kukharsky A. V., Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya modelirovaniya vodnogo i teplovogo rezhimov sel'skikh territorii (Using remote sensing data to model water and heat regimes of rural territories), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 108–136.

- Andreassian V., Bergström S., Chahinian N., Duan Q., Gusev Y. M., Litllewood I., Machevet T., Michel C., Montanary A., Moretti G, Moussa R, Nasonova O. N., O'Connor K., Paquet E., Perrin C, Rousseau A., Schaake J., Wagener T., Xie Z., Catalogue of the models used in MOPEX 2004/2005, In: *Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment – MOPEX*, Andreassian V., Hall A., Chahinian N., Shaake J. (eds.), IAHS Publ., 2006, No. 307, pp. 41–93.
- 3. Baghdadi N., Gherboudj I., Zribi M., Sahebi M., Bonn F., King C., Semi-empirical calibration of the IEM backscattering model using radar images and moisture and roughness field measurements, *Intern. J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, pp. 3593–3623.
- 4. Baghdadi N., Saba E., Aubert M., Zribi M., Baup F., Comparison between backscattered TerraSAR signals and simulations from the radar backscattering models IEM, Oh, and Dubois, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, Vol. 8, pp. 1160–1164.
- Brocca L., Crow W. T., Ciabatta L., Massari C., de Rosnay P., Enenkel M., A Review of the Applications of ASCAT Soil Moisture Products, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 5, pp. 2285–2306.
- 6. Chen J. M., Chen X., Ju W., Geng X., Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs, *J. Hydrology*, 2005, Vol. 305, No. 1, pp. 15–39.
- Cloude S., The dual polarisation entropy/alpha decomposition: a PALSAR case study, Proc. 3rd Intern. Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry (POLinSAR 2007), Frascati, Italy, 22–26 Jan. 2007, pp. 1–6.
- 8. Davidson M. W. J., Le Toan T., Mattia F., Satalino G., Manninen T., Borgeaud M., On the characterization of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, No. 2, pp. 630–640.
- Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T., El-rayes M. A., Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – Part II: Dielectric Mixing Models, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1985, Vol. GE-23, No. 1, pp. 35–46.
- El Hajj M., Baghdadi N., Zribi M., Belaud G., Cheviron B., Courault D., Charron F., Soil moisture retrieval over irrigated grassland using X-band SAR data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 176, pp. 202–218.
- El Hajj M., Baghdadi N., Zribi M., Bazzi H., Synergic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Images for Operational Soil Moisture Mapping at High Spatial Resolution over Agricultural Areas, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, p. 1292.
- Entekhabi D., Yueh S., O'Neill P., Kellogg K., Allen A., Bindlish R., Brown M., Chan S., Colliander A., Crlow W.T., Das N., De Lannoy G., Dunbar R.S., Edelstein W.N., Entin J.K., Escobar V., Goodman Sh. D., Jackson Th.J., Jai B., Johnson J., Kim E., Kim S., Kimball J., Koster R. D., Leon A., McDonald K.C., Moghaddam M., Mohammed P., Moran S., Njoku E.G., Piepmeier J.R., Reichle R., Rogez F., Shi J. C., Spencer M. W., Thruman S. W., Tsang L., Van Zyl J., Weiss B., West R., *SMAP Handbook: Soil Moisture Active Passive. Mapping Soil Moisture and Freeze/Thaw from Space*, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, Jet Propulsion Lab., 2014, 192 p.
- 13. Gao H., Zhang W., Chen H., An Improved Algorithm for Discriminating Soil Freezing and Thawing Using AMSR-E and AMSR2 Soil Moisture Products, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10(1697), pp. 1–17.
- 14. Gowda P. H., Chavez J. L., Colaizzi P. D., Evette S. R., Howell T. A., Tolk J. A., ET mapping for agricultural water management: present status and challenges, *Irrigation Science*, 2008, Vol. 26, pp. 223–237.
- Hachani A., Ouessar M., Paloscia S., Santi E., Pettinato S., Soil moisture retrieval from Sentinel-1 acquisitions in an arid environment in Tunisia: application of Artificial Neural Networks techniques, *Intern. J. Remote Sensing*, 2019, Vol. 40(24), pp. 9159–9180.
- Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. C., El-rayes M. A., Wu L., Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – Part 1: Empirical Models and Experimental Observations, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1985, Vol. GE-23, No. 1, pp. 25–34.
- 17. Mialon A., Parrens M., Richaume P., Delwart S., Kerr Y., Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS and SMAP soil moisture retrieval algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 192, pp. 238–262.
- Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V., Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47, No. 7, pp. 2059–2070.
- Mirsoleimani H. R., Sahebi M. R., Baghdadi N., El Hajj M., Bare, Soil Surface Moisture Retrieval from Sentinel-1 SAR Data Based on the Calibrated IEM and Dubois Models Using Neural Networks, *Sensors*, 2019, Vol. 19, p. 3209.
- 20. Moehrlen C., *Literature review of current used SVAT models*, *Internal Report 04-99*, Cork, Ireland: University College, Department of Civil and Environmental Engineering, 1999, 22 p.

- 21. Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T., An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, No. 2, pp. 370–381.
- 22. Overgaard J., Rosbjerg D., Butts M.B., Land-surface modeling in hydrological perspective a review, *Biogeosciences*, 2006, Vol. 3, pp. 229–241
- 23. Paloscia S., Pampaloni P., Pettinato S., Santi E., A comparison of algorithms for retrieving soil moisture from Envisat/ASAR images, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, pp. 3274–3284.
- 24. Paloscia S., Pettinato S., Santi E., Notarnicola C., Pasolli L., Reppucci A., Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 134, pp. 234–248.
- 25. Pitman A.J., The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models, *Intern. J. Climatology*, 2003, Vol. 3, pp. 479–510.
- 26. Startseva Z., Muzylev E., Volkova E., Uspensky A., Uspensky S., Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, No. 15, pp. 5775–5799.
- 27. Thoma D., Moran M., Bryant R., Rahman M., Holifield-Collins C., Skirvin S., Sano E., Slocum K., Comparison of four models to determine surface soil moisture from C-band radar imagery in a sparsely vegetated semiarid landscape, *Water Resources Research*, 2006, Vol. 42, pp. 1–12.
- 28. Ulaby F., Long D., *Microwave radar and radiometric remote sensing*, Norwood, MA: Artech House, 2015, 1014 p.
- 29. Wang H., Méric S., Allain S., Pottier E., Adaptation of Oh Model for soil parameters retrieval using multiangular Radarsat-2 datasets, *J. Surveying and Mapping Engineering*, 2014, Vol. 2, pp. 65–74.
- 30. Wigneron J.-P., Jackson T.J., O'Neill P., De Lannoy G., de Rosnay P., Walker J. P., Ferrazzoli P., Mironov V., Bircher S., Grant J. P., Kurum M., Schwank M., Munoz-Sabater J., Das N., Royer A., Al-Yaari A., Al Bitar A., Fernandez-Moran R., Lawrence H., Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS and SMAP soil moisture retrieval algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 192, pp. 238–262.
- 31. Zeng J., Chen K. S., Bi H., Chen Q., A Preliminary Evaluation of the SMAP Radiometer Soil Moisture Product Over United States and Europe Using Ground-Based Measurements, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, No. 8, pp. 4929–4940.
- 32. Zhang L., Meng Q., Hu D., Zhang Y., Yao S., Chen X., Comparison of different soil dielectric models for microwave soil moisture retrievals, *Intern. J. Remote Sensing*, 2020, Vol. 41, No. 8, pp. 3054–3069.