

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУШИ С АТМОСФЕРОЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

УДК 528.88:556.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОДНОГО И ТЕПЛОВОГО РЕЖИМОВ УЧАСТКОВ СУШИ: ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ¹

© 2023 г. Е. Л. Музылев*

Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

**e-mail: muzylev@iwp.ru*

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 31.01.2023 г.

Принята к публикации 20.03.2023 г.

Представлен обзор результатов оценки влажности поверхности почвы, ее влагозапасов и эвапотранспирации как элементов водного и теплового режимов участков поверхности суши различных пространственных масштабов при использовании данных дистанционного зондирования Земли разных спектральных диапазонов. В большинстве приводимых примеров такие оценки были получены с помощью моделей взаимодействия земной поверхности с атмосферой. Отдельный раздел посвящен результатам расчета влажности поверхности почвы и влагозапасов при использовании спутниковой информации микроволнового диапазона, в том числе данных радаров. Приведены результаты оценки влажности поверхности почвы с помощью нейронных сетей. Кратко описаны международные гидролого-атмосферные эксперименты, проводившиеся в рамках всемирных исследовательских проектов с целью получения информации о процессах влаго- и теплообмена между подстилающей поверхностью и приземным слоем атмосферы. Сделан обзор баз наземных, спутниковых и модельных данных, формировавшихся по результатам исследований по описанной тематике с середины 1980-х гг. Представлены перспективы дальнейших исследований, опирающихся на разработку новой мультиспектральной аппаратуры, создание новых баз данных и использование нового поколения спутников – микросателлитов глобального покрытия с датчиками высокого разрешения.

Ключевые слова: спутниковые данные, моделирование процессов влаго- и теплообмена, водный и тепловой режимы, характеристики подстилающей поверхности, влажность почвы, эвапотранспирация, пространственное разрешение.

DOI: 10.31857/S0321059623700025, **EDN:** QISSLC

ВВЕДЕНИЕ. ПРОБЛЕМАТИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Интерес к использованию данных дистанционного зондирования в задачах моделирования водного и теплового режимов территорий суши возник к середине 1980-х гг., когда, с одной стороны, стали активно разрабатываться модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой [7, 39, 71, 132], а с другой, благодаря прогрессу в создании новой оптико-электронной и радиотехнической аппаратуры, устанавливаемой на запускаемых космических носителях, и проведению дистанционных измерений характеристик подстилающей поверхности была получена информация о пространственных и временных изменениях

этих характеристик [68, 126–128, 134], пригодная для расширения информационного содержания моделей [13, 110, 133, 142]. Объединение этих двух подходов в одно общее направление исследований процессов влаго- и теплообмена побудило к проведению международных гидролого-атмосферных полевых экспериментов HAPEX-MOBILHY (1986 г.) [14, 124], HAPEX-SAHEL (1992, 1991–1993 гг.) [51], FIFE (1987, 1989 гг.) [129, 130], КУРЭКС (1988, 1991 гг.) [70, 72], EFEDA (1991–1994 гг.) [26, 27], BOREAS (1993–1996 гг.) [108, 131], MOREX (1996–2003, 2004–2009 гг.) [15, 42, 123] и др., к организации в рамках всемирной программы климатических исследований WCRP (с 1980 г.) проекта глобального энергетического и водного обмена GEWEX (с 1990 г.) [141], а также к реализации в рамках международной геосферно-биосферной программы

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (проект 1–14, тема FMWZ-2022-0001).

IGBP (1987–2015 гг.) [62] основного проекта ВАНС (с 1993 г.) [24, 59]. Целью практически всех перечисленных полевых экспериментов было проведение измерений характеристик подстилающей поверхности (ПП), в том числе характеристик растительности, а также водных и тепловых потоков и потоков вещества (как правило, с привлечением данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)), для оценки параметров моделей взаимодействия между ПП и атмосферой и выявления роли биосферы в этом взаимодействии. Цель проекта GEWEX состоит в изучении энергетического и водного циклов Земли и количественной оценке потоков воды и энергии в региональном и глобальном масштабах [141]. Цель программы IGBP – формирование представлений о поведении различных элементов земной системы под воздействием физических, химических и биологических процессов, а также составление описания антропогенного влияния на глобальные процессы, составляющие водный цикл и циклы углерода, азота, серы и фосфора. Проект ВАНС предназначался для исследования влияния элементов биосферы, в частности растительности, на динамику гидрологического цикла путем проведения экспериментов и моделирования процессов формирования потоков энергии, воды, углекислого газа и наносов в системе “почва–растительность–атмосфера” для различных пространственных и временных масштабов. Поскольку существенное воздействие растительности на формирование этих потоков делает ее важным фактором регулирования гидрологического цикла и формирования климата, прослеживание преобразований растительного покрова, вызванных деятельностью человека и являющихся одной из причин климатических изменений, было важной задачей проекта. Программа ВАНС также включала изучение влияния климата и деятельности человека на аккумуляцию и речной транспорт седиментов [59].

Полученная по данным наземных измерений, данным ДЗЗ и при моделировании влаго- и теплообмена информация была в определенной мере сведена в региональные и глобальные базы данных о характеристиках ПП и метеорологических характеристиках – в том числе в расширяющиеся до сего дня и возникающие новые. К ним относятся системы и базы данных GCOS [50], NCEI NOAA [102] – ISD [63] и LCD [77]. Система наблюдений GCOS, созданная в 1992 г. при поддержке WCRP, определила 50 важнейших климатических переменных, пригодных для глобального наблюдения за климатом. Среди вносящих основной вклад в GCOS – интегрированная глобальная система наблюдений BMO WIGOS и Всемирная система наблюдений за гидрологическим циклом WHYCOS с базами данных. ISD представляет собой глобальную базу данных еже-

часных и синоптических наблюдений за характеристиками ПП и приземного слоя атмосферы из многочисленных (свыше 100) источников по более чем 20000 станций. Эти данные собраны в общем формате и объединены в единую модель данных. База LCD содержит наборы климатических данных, представляющих обобщения локальных климатических условий для более чем 2500 метеостанций и аэропортов США. Глобальная база данных ECOCLIMAP-I [5, 91] и усовершенствованная с привлечением наборов данных для территории Европы ECOCLIMAP-II [46] используются для инициализации (задания начальных условий и значений параметров) моделей типа SVAT для метеорологических и климатических моделей (во всех горизонтальных масштабах). При формировании базы данных ECOCLIMAP-I для районов с однородной растительностью, выделенных путем объединения карт ПП и климатических карт с привлечением данных AVHRR, при использовании полей значений *LAI*, построенных по этим данным, были получены значения всех параметров модели – характеристик растительного покрова и метеорологических характеристик [91]. При построении базы ECOCLIMAP II была использована более сложная детализация исследуемых территорий по типам ПП и видам растительности (определенным кластерам) и привлечены две прокси-переменные – *NDVI* и *LAI*, определявшиеся, соответственно, по данным радиометров SPOT/Vegetation и MODIS. Для этих кластеров были получены значения всех параметров модели ISBA класса SVAT (разработана “Météo France”) [46]. Глобальная база данных ISLSCP II, сформированная в ORNL DAAC NASA при выполнении одноименного проекта – части проекта GEWEX, содержит заархивированные всеобъемлющие наборы данных 1986–1995 гг. о характеристиках ПП, гидрологических, метеорологических, радиационных и почвенных характеристиках с разрешением $1/4^\circ$, $1/2^\circ$ и 1° [29]. Эти архивы были дополнены наборами оценок ПП – *NDVI*, альbedo, *LAI* и других характеристик по спутниковым данным сенсоров AVHRR, MODIS, SPOT/Vegetation, VIIRS за более поздние годы [29]. Часть “Гидрология и почвы” этой базы включает, к примеру, наборы оценок доступной для растений доли запасов почвенной влаги, оценок месячных объемов стока, наборов данных о суточных, пентадных, месячных суммах осадков, а также данные об осадках, необходимые для решения климатических задач [64], и множество наборов других данных.

За последние 25 лет были сформированы глобальные и континентальные ГИС-базы данных разной направленности – гидрологические, климатические, почвенные. К глобальным относятся, например: база данных о наземном покрове Геологической службы США USGS LCI; база

данных IRI/LDEO CDL Института Земли Колумбийского университета и обсерватории Земли Ламонт-Доэрти этого же университета, содержащая наборы из более чем 300 климатических моделей и баз; база почвенных характеристик HWSD FAO [45], содержащая данные о текстурных параметрах, глубинах, кислотности почв; глобальная база данных о высотах ASTER GDEM с 30-метровым разрешением, построенная по спутниковым изображениям радиометра ASTER; набор обновляемых карт свойств и классов почв мира с разрешением 1 км (SoilGrids1km – soil property and class maps), созданных с использованием современных статистических методов; глобальная база данных CHELSA с разрешением 1 км, первая реализация которой [66] содержала наборы оценок температуры воздуха, сформированных при статистическом уменьшении масштаба, и месячных сумм осадков, полученных по данным климатического реанализа ERA-Interim с использованием в качестве предикторов скорости ветра, экспозиции склонов долин и высот пограничного слоя атмосферы. Вторая реализация [30] включала в себя наборы месячных оценок дефицита давления пара, приходящей коротковолновой радиации, потенциальной эвапотранспирации, климатического индекса влажности и водного баланса участка за 1980–2018 гг. Эти оценки были сформированы по результатам расчета при объединении данных, полученных путем уменьшения с помощью дельта-метода масштаба временных рядов относительной влажности воздуха вблизи земной поверхности и доли площади облаков и механического уменьшения масштабов для данных о температуре, осадках и солнечном излучении. К ГИС-базам данных глобального уровня также относятся OpenAerialMap с открытой лицензией, представляющая набор инструментов для поиска, обмена и использования изображений со спутников и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), и OpenLandMap, содержащая наборы разнообразных данных о Земле (так называемую маску Земли) – о ПП, растительности, почвах, климате, информацию о местности и т. п.

Упомянем среди континентальных баз ГИС – европейскую базу ESDAC [112], содержащую информацию Европейской базы почвенных данных, наборы оценок эрозии почвы, количества органического углерода в почве, ее биоразнообразия, а также данные LUCAS (результаты лабораторных физических и химических анализов верхнего (0–20 см) слоя почвы для образцов, взятых более чем в 20000 точек территории стран Евросоюза) и т. д. Отметим также две ГИС-базы данных для США: NGDC – базу находящихся в свободном доступе цифровых моделей рельефа (ЦМР), данных о ПП, сейсмологических и прочих данных и базу данных о почвах министерства сельского хозяйства США – USDA NRCS. Последние могут

совмещаться с различными наборами данных с помощью онлайн-инструмента картографирования Web Soil Survey.

Значительное внимание в минувшие десятилетия уделялось и формированию баз данных ДЗЗ о характеристиках ПП и метеорологических характеристиках для их использования при моделировании процессов влаго- и теплообмена. Представим для примера ряд источников этих данных, находящихся в открытом доступе. К ним относятся: база USGS Earth Explorer для разных территорий, содержащая данные Landsat, рассекреченные данные 1960–1970 гг. со спутников системы CORONA, гиперспектральные данные, полученные с помощью спектрометра NASA Hyperion; набор Sentinel Open Access Hub с данными съемки двенадцатиканальной мультиспектральной камерой в диапазонах от видимого до SWIR с борта Sentinel-2 при 10-метровом разрешении во VNIR диапазонах и данными съемки с помощью SAR в микроволновом С-диапазоне с борта Sentinel-1 с разрешением от 5×5 до 20×40 м при более низком, чем у Sentinel-2, качестве изображений; база NASA Earthdata Search (большинство данных которой поступает из центра NASA DAAC), представляющая собой продукты для анализа земных процессов, является высококлассным источником информации о глобальном землепользовании и растительном покрове и содержит такие специализированные спутниковые данные, как типы вечной мерзлоты и водно-болотных угодий; набор NOAA Data Access Viewer, содержащий спутниковые изображения, аэрофотоснимки и изображения, полученные с помощью лидаров; база данных компании DigitalGlobe – коммерческого оператора ИСЗ сверхвысокого разрешения GeoEye-1, QuickBird, IKONOS, группировки WorldView, из которой возможна бесплатная загрузка всей библиотеки 30-сантиметровых изображений DigitalGlobe. При любом стихийном бедствии Программа открытых данных DigitalGlobe в целях помощи бесплатно предоставляет спутниковые снимки пожаров, наводнений, ураганов, тайфунов и землетрясений. Также возможно бесплатное получение образцов данных – контуров зданий, высот, стереоизображений и изображений в реальном цвете. База данных компании Geo-Airbus Defense – коммерческого поставщика спутниковых изображений ИСЗ SPOT, Pleiades и RapidEye – включает набор образцов снимков, однако выбор бесплатных спутниковых изображений весьма ограничен. К предлагаемым образцам относятся оптические изображения SPOT с разрешением ≤ 1.5 м, радарные изображения TerraSAR-X с разрешением ≤ 3 м и горизонтальными сечениями ЦМР WorldDEM с разрешением 12 м (более точной, чем ЦМР ASTER и SRTM). База данных Национального института космических исследований Бразилии (INPE) является катало-

гом изображений INPE, похожим на библиотеку для бесплатной загрузки спутниковых изображений. Большую часть этого каталога составляют снимки китайско-бразильских спутников CBERS, все данные относятся к Южной Америке и Африке. В него также войдут данные CBERS-4 [114], индийского спутника ResourceSat и британского UK-DMC 2. Глобальная ЦМР AW3D30 с 30-метровым пространственным разрешением является находящимся в открытом доступе набором данных всемирного уровня, созданным по результатам съемки с борта ИСЗ ALOS JAXA аппаратурой PRISM оптического диапазона с разрешением 2.5 м. Этот набор сформирован на основе набора данных версии ЦМР с 5-метровой сеткой World 3D Topographic Data, который в настоящее время в глобальном масштабе содержит наиболее точные данные о высотах. На веб-сайте VITO Vision размещены бесплатные спутниковые снимки ИСЗ PROBA-V (PROBA-Vegetation), SPOT-Vegetation и MetOp. Эти спутники с низким разрешением “вырезают” на поверхности Земли “узоры” из растительности. В информационной базе Satellite Land Cover указаны на глобальном уровне источники данных с Landsat, MODIS и AVHRR о земном покрове, позволяющих судить о количественных изменениях его характеристик во всем мире — для территорий с различными геологическими и гидрологическими условиями, с разной растительностью и сельскохозяйственными особенностями, а также для городских районов. Расширяющейся базой данных, используемых при моделировании влаго- и теплообмена, является база GLASS, число размещаемых спутниковых продуктов в которой возросло с 5 в 2012 г. [84] до 14 в 2020 г. [83]. В настоящее время база содержит сформированные по результатам измерений AVHRR и MODIS наборы данных о *LAI*, широкополосных альбедо *A* и длинноволновой излучательной способности *E*, приходящей коротковолновой *R* и результирующей длинноволновой радиации, фотосинтетически активной радиации *PAR*, а также ее поглощенной доле *FAPAR*, температуре ПП *LST*, проективном покрытии растительностью *B*, эвапотранспирации *ET*, потоке скрытого тепла *LE* и др. [83]. Продолжительность непрерывных измерений *LAI*, *A*, *E*, *R* и *PAR* превышает 35 лет (с 1981 г. по настоящее время) при отсутствии пропусков, пространственное и временное разрешение первых трех из них составляет 1–5 км и 8 дней, а двух последних — 5 км и 3 ч. Широко используется в настоящее время и база данных Landsat USGS [74], пополняемая с февраля 2022 г. результатами зондирования с Landsat-9 [75]. Глобальные данные Landsat-9 OLI-2 в девяти диапазонах (VNIR, SWIR и др.) с разрешением 30 м и TIRS-2 в двух тепловых диапазонах [76] обеспечивают возможность получения значительного числа оценок характеристик ПП и при-

земного слоя атмосферы, требуемых для реализации гидрологических моделей. Использование информации о классификации земель, проведенной в соответствии со схемой классификации IGBP, из набора данных классификации наземных экосистем MODIS MOD12Q1 [98], а также ежедневных, восьмидневных и месячных данных об альбедо и NDVI, полученных по измерениям MODIS с разрешением в 1 угловую минуту [97], совместно с данными Landsat-9 приведет к повышению точности расчетов с помощью этих моделей.

Запуск в последние 15–20 лет перечисленных выше спутников с аппаратурой как высокого, так и низкого разрешения обусловил дополнительное появление данных, пригодных для использования в моделях на территориях самых разных масштабов — от локального до глобального, и, как следствие, формирование соответствующих баз данных. Среди них: GLCC [87], GLDAS [120], NLDAS-1 [96], NLDAS-2 [155] и другие LDAS [154]. Выведение на орбиту спутников MetOp-A, -B, -C, SMOS, SMAP, GCOM-W1 и GCOM-C1, упомянутых Sentinel-1 и других с активными и пассивными датчиками микроволнового диапазона, а также с радарами обеспечило при использовании полученных данных проведение расчетов влажности почвы на территориях размерами, определявшимися разрешением спутниковой аппаратуры, от отдельного поля до континента [44, 69, 107, 116, 118, 137, 138, 145]. Активно развивающаяся в последние годы спутниковая съемка с помощью радаров с синтезированной апертурой SAR привлекает интерес пользователей своей всепогодностью, т. е. отсутствием зависимости от облачности, присущей данным VNIR диапазонов, возможностью направляемых со спутника SAR радиоволн проникать под кроны деревьев и затем регистрироваться в виде отраженного сигнала и, таким образом, предоставлять информацию без временных задержек. В качестве примеров реализации данной технологии перечислим спутники 1-го поколения (2007–2012 гг.): TerraSAR-X, Radarsat-2, COSMO-SkyMed, TanDEM-X, — и 2-го поколения (с 2018 г.): SGS-1, PAZ. Отметим также, что находящиеся в свободном доступе снимки 10-метрового разрешения Sentinel-1 с повторной съемкой в течение 6–12 дней оказались приемлемыми для сложившегося сообщества пользователей данных SAR. На сегодняшний день эти данные используются для исследования антарктических айсбергов и обнаружения изменений в окружающей среде, а также для картирования последствий природных или антропогенных воздействий. Примеры такого использования — отслеживание последствий взрывов, разрушений, лесных пожаров, наводнений; мониторинг морских и прибрежных зон, в том числе разливов нефти при авариях танкеров; монито-

ринг земель, в частности определение местоположения оседания грунта и областей, подвергающихся риску обвалов и оползней; исследование состояния растительности (формирования полога, плотности и темпов роста посевов) и особенностей ведения сельского хозяйства (определения границ и размеров полей, а также времени посадки и сбора урожая). При переходе в последние 5–7 лет к созданию группировок микроспутников малых размеров с весом <100 кг, обусловленному существенно более низкой стоимостью их запуска по сравнению с традиционными ИСЗ, возможности использования данных SAR резко возросли. Появились финский микроспутник ICEYE-X1 (2018 г.), затем еще 16 спутников компании ICEYE, спутники SAR Denali (2018 г.) и Sequoia (2020 г.) компании “Capella Space” (США), запустившей еще 5 спутников глобального уровня с часовым временным разрешением. Максимальное на сегодняшний день количество микроспутников CubeSat – почти 200 – запущено компанией “Planet”. Их данные активно используются для решения описанных выше задач.

Помимо использования при моделировании процессов влаго- и теплообмена данных разных носителей – обычных спутников с аппаратурой различных спектральных диапазонов, микроспутников с VNIR датчиками и радаром, самолетов, БПЛА, нередко проводится объединение этих данных с моделями и формирование соответствующих баз, например базы GLDAS Noah – симбиоза Глобальной системы усвоения данных о земле GLDAS и LSM Noah. Такое объединение содержит больший объем информации, чем результаты обычных наблюдений [92, 143]. Сформированные подобным образом наборы результатов моделирования сравниваются с результатами измерений, собранными в базах данных, организованных в рамках программ NASA GRACE [173] и ее продолжения (с 2018 г.) GRACE-FO [52] и являющихся одними из наиболее информативных. Для их пополнения используются, помимо традиционных, данные ИСЗ ICESat-2 [36, 60, 61] и будут использоваться данные намеченных к запуску WCOM [135–137] и SWOT [23, 43, 54]. При выполнении программ, аналогичных GRACE-FO, также расширяются соответствующие базы наземных и спутниковых данных, данных реанализа и результатов моделирования процессов влаго- и теплообмена, например такие, как OSCAR/Surface и OSCAR/Space [109], входящие в систему WIGOS [149, 150].

Перспективы развития спутниковых технологий для оценки характеристик земной поверхности и приземного слоя атмосферы и использования этих оценок при моделировании влаго- и теплообмена – создание новой мультиспектральной аппаратуры высокого разрешения, формирование обширных баз данных, в том числе облач-

ных, и методов их обработки и ассимиляции в моделях. Получение аналогичной информации с помощью большого количества микроспутников с низкой стоимостью запуска и с сенсорами разных диапазонов – от VNIR до микроволнового, обладающих высокой (1.5–4 м) разрешающей способностью, покрывающих земную поверхность несколько раз за сутки, также является крайне востребованным и перспективным.

В рамках описанной проблематики в настоящем обзоре рассмотрены вопросы использования спутниковых данных при моделировании элементов водного и теплового режимов участков суши – вертикальных потоков влаги и тепла, влажности почвы.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО И ТЕПЛООВОГО РЕЖИМОВ УЧАСТКОВ СУШИ

Использование спутниковых данных при моделировании вертикальных потоков влаги и тепла

Моделирование водного и теплового режимов разных территорий предполагает воспроизведение динамики влагозапасов почвы, эвапотранспирации ET (т. е. суммарного испарения – испарения с голой почвы и транспирации растительности), вертикальных потоков тепла LE и H и других составляющих гидрологического цикла, как правило, с помощью моделей влаго- и теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой, например класса LSM, содержащих уравнения влагопереноса и теплопроводности [9, 111, 115, 140]), или балансовых типа SEBAL, METRIC, SEBS, TSEB и др. [20, 21, 80, 88]. Информационную основу LSM составляют наборы значений характеристик почв, растительности, снежного покрова, обычно являющихся параметрами моделей, а также массивы метеорологических данных, используемых в качестве входных переменных [8, 9, 93, 101, 140]. При традиционных подходах эти значения определялись по данным наземных наблюдений, в настоящее время большую их часть получают по данным ДЗЗ. Эти данные используются в LSM для оценки параметров, таких как характеристики почв и ПП; выявления зон осадков и их количеств; задания начальных условий для модели, например влажности почвы SM, и построения меняющихся во времени оценок состояния ПП, таких как запасы воды в снежном покрове SWE . Набор используемых в LSM гидрологических характеристик, определяемых с привлечением данных ИСЗ, и способы их ассимиляции в моделях представлены в работе [55]. Оценки части этих характеристик – вегетационного индекса $NDVI$, излучательной способности

ПП E , проективного покрытия растительностью B , листового индекса LAI , температуры подстилающей поверхности LST , осадков — строились при использовании разработанных технологий тематической обработки данных измерений в видимом и ИК-каналах радиометров AVHRR/NOAA, VIIRS/SNPP, MODIS/Terra и Aqua, MCY-MP/Метеор-М, SEVIRI/Meteosat [1–4, 10, 11]. В работе [93] значения альбедо, $NDVI$ и LAI определялись по данным MODIS. Многие из работ данной проблематики, выполненных при использовании балансовых моделей, имели целью получение оценок только величин ET или LE [12, 22, 32, 144, 147, 160]. В этих работах значения данных величин определялись разными способами: рассчитывались по формулам Пенмана–Монтейта [80, 88, 144] или Пристли–Тейлора [32], вычислялись с использованием результатов измерений лизиметра [22, 144] или как остаточный член уравнения радиационного баланса [12, 22, 82, 144, 147], по измерениям потоков с вышек [80, 88, 153] или скантисиллометров с большой апертурой LAS [80] или оценивались по данным MODIS/TERRA (продукт MOD16A2) и MODIS/AQUA (MYD16A2) [80, 144]. В работе [16] потоки LE (и ET) и H рассчитывались с помощью модели SEBAL, в уравнения которой вводились значения альбедо и LST , определявшиеся при использовании данных сенсоров OLI и TIRS ИСЗ Landsat-8 и MODIS/Terra (продукт MOD09A1). Погрешность оценок ET не превышала 0.35 мм/сут и была заключена между 11 и 12.5%, а оценок H — между 26 и 35%. В работе [103] приведены оценки уровней грунтовых вод при построении их регрессионных зависимостей от потенциальной эвапотранспирации, рассчитываемой в свою очередь с использованием балансового алгоритма модели SEBAL. Общее практическое для всех этих моделей — использование информации о характеристиках растительности — $NDVI$, E , LAI , полученной по данным MODIS [32, 144, 147], VIIRS [80], Landsat-5, -8 [22, 103, 147], а также о тепловых потоках, по которым рассчитываются LST и LE , определенных по данным MODIS и Landsat [32, 144, 147], Landsat-5, -8 [22, 49, 103] с разрешением 30–120 м, MODIS и VIIRS [80], ASTER [88]. По измерениям радиометров, установленных на самолетах, также получают оценки $NDVI$, B и LAI [153] и тепловых потоков [49]. Рассчитанные значения последних сравниваются с результатами измерений с “flux towers” [153]. Оценки вертикальных потоков влаги и тепла на разных уровнях над земной поверхностью проводились также в ходе комплексного эксперимента LAFE [152], в котором с использованием доплеровских лидаров определялись скорость ветра, температура и абсолютная влажность воздуха, по самолетным и вертолетным данным для участка 10×10 км находились альбедо, $NDVI$, LAI и LST , влажность почвы была определена по

сетевым данным, величины радиационных потоков измерялись методом вихревой ковариации на “flux towers”, установленных на SEB-станциях. Временное разрешение данных лидаров 1–10 с, пространственное — 30–300 м. Во многих работах часть исходной информации получена из баз спутниковых и наземных данных; так, в работе [12] набор значений характеристик растительности загружен из архивов SPOT-Vegetation data и Global Land Cover Map, а оценки LST и радиационных потоков — из базы данных LSA SAF с 15-минутным временным и трехкилометровым пространственным разрешениями.

Аналогичный подход реализован и на глобальном уровне при исследовании соответствия оценок суммарного испарения, полученных с привлечением спутниковой информации при использовании трех разных методологий и наборов входных данных, включающих CSIRO-PML [163], MOD16(A2) [99] и GLEAM [86, 89, 90, 94, 95], а также оценок осадков по данным GPCP [57] и изменений влагозапасов по данным GRACE [92] для бассейнов оз. Эри, Аральского моря, рек Колорадо и Нигер [86]. Пространственное разрешение составило для MOD16 (A2) — 0.5° , для CSIRO-PML и GLEAM — 0.25° , для осадков GPCP (1DD v1.2) — 1° [58] и для GRACE — 333 км. Оценки характеристик растительного покрова ($NDVI$, LAI и др.), данные о LST , радиационных потоках, метеоданные, в том числе по осадкам, взяты из различных баз и архивов. Возрастание в последние 3–4 года объемов информации, привлекаемой для оценки вертикальных потоков влаги и тепла, увеличивает возможности реализации современных LSM, таких как SURFEX, JULES, ORCHIDEE, CLM5, CABLE, для территорий разных пространственных масштабов при использовании мозаичной подсеточной структуры, позволяющей дезагрегировать наборы требуемых оценок водных и энергетических характеристик из баз спутниковых и наземных данных [25, 48].

Использование данных ДЗЗ для оценки влажности почвы

Востребованность оценок влагозапасов почвы W для разных по размерам территорий определяется значимостью этой величины как одной из составляющих их водного баланса — индикатора состояния водных ресурсов. Например, в работе [162] для 168 речных водосборов оценены изменения земных запасов влаги как суммарная реакция на глобальные изменения количества осадков, величин эвапотранспирации и объемов стока. Данные о земных влагозапасах были получены по информации GRACE, оценки влагозапасов почвы и растительности, запасов влаги на земной поверхности, а также влагозапасов снежного покро-

ва были скомпилированы из баз данных GLDAS, два набора данных об осадках были взяты из баз CRU и GPCC, оценки эвапотранспирации были сформированы по данным MODIS (MOD16A2), а также скачаны из базы данных GLDAS, значения потенциальной эвапотранспирации были взяты из набора данных CPU, а данные о стоке — из работы [37]. Цифровая карта 168 водосборов была получена из GRDC. Вклад осадков в определенные по данным GRACE глобальные изменения земных влагозапасов составил 42.6%, вклад эвапотранспирации — 43.2%, а вклад стока — 14.2%. Полученные результаты могут иллюстрировать возможную структуру таких изменений при изменениях климата. Запасы W являются также важным показателем водообеспеченности, они определяют динамику роста растений и, как следствие, сельхозпродуктивности, что заметно проявляется при недостатке этих запасов и засухах. Оценки величины W необходимы также для расчета характеристик стока и прогнозирования паводков и наводнений, особенно для больших рек.

Оценки влажности поверхности почвы и влагозапасов ее деятельного слоя с использованием дистанционных данных микроволнового диапазона

В последние 20 лет количество оценок величины W , построенных по данным ДЗЗ микроволнового диапазона и получаемых при любой погоде, значительно возросло. В зависимости от решавшихся задач эти оценки проводились для территорий площадью от единиц до сотен тысяч квадратных километров с использованием результатов измерений радиометров AMSR-E/Aqua [111] и AMSR-2/GCOM-W1 [6, 107, 138] в C-, X-, K-, Ka- и W-диапазонах с разрешением у AMSR-2 от 35×62 км на частоте 6.9 ГГц до 3×5 км на частоте 89.0 ГГц [6, 107]; радиометра MIRAS спутника SMOS в L-диапазоне со средним разрешением 43 км [69]; радиометра и радара спутника SMAP в том же диапазоне с разрешением радиометра 40 и радара 3 км [44, 118]; скаттерометра ASCAT/MetOp-A, -B, -C в C-диапазоне с разрешением 12.5 км [19, 145]; радара спутников Sentinel-1A, -1B в том же диапазоне с разрешением от 5×5 до 25×100 м [17, 18]. Поскольку пространственное разрешение пропорционально диаметру антенны и обратно пропорционально длине волны, при малых длинах волн для достижения большого разрешения при зондировании с высоты в несколько сотен километров требуется антенна значительного диаметра, что является серьезной технической проблемой [69]. Отметим, что для решения отдельных практических задач в рамках HSAF [56] была предложена процедура дезагрегации оценок влажности поверхности почвы (ВПП) по данным ASCAT с разрешением от 25 до 1 км, основанная на использовании линейного

регрессионного уравнения с привлечением данных радара ASAR спутника ENVISAT и данных in situ [145]. При описанном разбросе значений разрешающей способности микроволновой аппаратуры можно производить оценки величины W в глобальном и региональном масштабе, на уровне конкретного речного водосбора или даже отдельного поля. В работе [28] по данным радиометра AMSR-E/ Aqua (с помощью трех разных алгоритмов) и скаттерометра ASCAT/MetOp были получены оценки ВПП до глубины 5 см на 17 участках в Италии, Испании, Франции и Люксембурге. Для расчета влажности почвы SM в корневой зоне использовался экспоненциальный фильтр. Наибольшая корреляция проведенных оценок с данными наблюдений отмечена для результатов, полученных по данным ASCAT для всех участков во Франции и центральной Италии, для остальных регионов результаты идентичны. Также выявлено, что увеличение плотности растительности приводит к снижению надежности всех спутниковых оценок SM . Предназначенные для различного применения оценки SM , сформированные при использовании данных измерений сенсоров микроволнового диапазона, таких как AMSR-E, TRMM-TMI, SSM/I, WindSat, ERS-1 и -2, ASCAT, а также SMOS и впоследствии SMAP, полученные с помощью LSM или результатов реанализа, а также из прогностических центров, например ECMWF или баз данных GLDAS и GSWP, были в 2011 г. объединены в ISMN [41, 65]. Для калибровки и верификации спутниковых и модельных оценок влажности почвы привлекались данные измерений in situ с часовым интервалом из надежных источников. Эти данные позволяли получать информацию о пространственной и временной изменчивости SM для различных масштабов. В работе [41] представлен обзор прямых и косвенных методов измерений SM in situ (гравиметрического, с помощью нейтронного влагомера и детектора нейтронов космических лучей, по различиям диэлектрической постоянной почвенных компонент и воды, при использовании тензиометров, по изменениям температуры почвы, связанным с ее влагосодержанием, а также с привлечением других способов). По состоянию на май 2011 г. ISMN содержала данные 16 региональных сетей и более 500 станций Италии, Франции, США, России, Монголии, Австралии, Испании, Франции, стран Западной Африки и других за период с 1952 по 2011 г., и в дальнейшем происходило расширение этой базы.

В работе [137] по данным самолетных измерений радиометров L- и S-, а также L- и C-диапазонов для разных пространственных масштабов строились профили SM от 0.1 до 0.4 м по глубине, сравнивавшиеся с измеренными. При этом основными мешающими факторами были шероховатость поверхности и наличие растительности.



Рис. 1. Влажность поверхности почвы, рассчитанная с помощью модели по данным наземных измерений (1) и при использовании оценок испарения, полученных с привлечением данных ASCAT/MetOp (2), определенная непосредственно по измерениям ASCAT (3). Агрометеорологическая ст. Даниловка (Волгоградская обл.). Сезон вегетации 2019 г.

Эти результаты показали, что совместное использование аппаратуры L- и S-диапазонов повышает точность оценки SM за счет более эффективной коррекции эффектов влияния растительности. Кроме того, данные наблюдений в S- и C-диапазонах имеют более высокое пространственное разрешение по сравнению с данными L-диапазона, поэтому их можно использовать для уменьшения масштаба данных наблюдений L-диапазона, например со спутников SMOS и SMAP, а в дальнейшем и WCOM. Поскольку по данным микроволнового диапазона напрямую определяется влажность поверхностного (0–3 см) слоя почвы, для оценки влагозапасов ее деятельного слоя используется несколько подходов. Первый заключается в имитации процесса распространения влаги в более глубокие слои почвы при использовании временных рядов *SWI*, имеющих экспоненциальную автокорреляционную функцию с характерным временем, согласующимся с теоретическим временем ожидания и результатами наблюдений [145]. Второй подход основан на применении расширенного фильтра Калмана, позволяющего учесть ошибки прогностической модели без ограничений на временной интервал усвоения полученных ранее спутниковых данных, с разбиением почвенной толщи на 4 слоя: 0–7, 7–28, 28–100 и 100–289 см [33, 34, 73, 120, 145]. В работах [116, 118] задействованы ансамблевые фильтры Калмана, в которых для оценки ковариационной матрицы ошибок прогнозов используются их ансамбли. В качестве исходной информации в работах [33, 34, 73, 120, 145] использованы данные ASCAT, в работе [118] — SMAP, в работе [116] — Sentinel-1. В рамках третьего подхода оценки значений W проводятся при использовании LSM. В моделях SVAT вертикальные профили влажности почвы рассчитываются с помощью уравнений влагопереноса и теплопроводности [8, 9]. При этом оценки характеристик растительности, осадков и *LST* строятся по данным измерений метеорологи-

ческих спутников. При расчетах влагозапасов для задания начальных профилей *SM*, а также для оценки испарения с поверхности почвы с помощью bulk-формулы на каждом временном шаге используются суточные композиты ВПП, формируемые по данным ASCAT/MetOp [8, 101]. В качестве примеров на рис. 1 представлены временные ходы ВПП за сезон вегетации, построенные для одной из станций Волгоградской области по данным ASCAT и по результатам моделирования, а на рис. 2 — распределение влагозапасов почвы по части территории Центрально-Черноземного региона России (ЦЧР) на одну из дат сезона вегетации 2017 г., рассчитанных по модели при использовании оценок ВПП по данным ASCAT и по наземным данным [101].

LSM Noah [35, 105] также используется для оценки величин W (как в глобальном, так и в региональном масштабе). В работе [161] такие оценки, полученные с помощью этой модели, ассоциированной с базой данных GLDAS, а также при использовании данных ECV, Европейского реанализа ERA-Interim, MERRA с пространственным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ и $1^\circ \times 1^\circ$, сравнивались с результатами 100 наблюдений *in situ* для трех участков Гималайско-Тибетского плато. При этом в целом модель Noah показала лучшие результаты. Отметим различия использовавшихся наборов данных. GLDAS-1 и GLDAS-2 — базы оценок характеристик ПП и потоков, сформированные путем объединения результатов спутниковых и наземных измерений при использовании LSM и методов ассимиляции данных. В ECV наборы оценок W скомпонованы по данным измерений разных сенсоров от радиометра SMMR/Nimbus-7 до скаттерометра ASCAT/MetOp. В ERA-Interim результаты реанализа были получены при альтернативном режиме усвоения данных с использованием 6-часовых циклов анализа и содержат оценки W для четырех слоев почвы (0–7, 7–28, 28–100 и 100–289 см) [158]. MERRA —

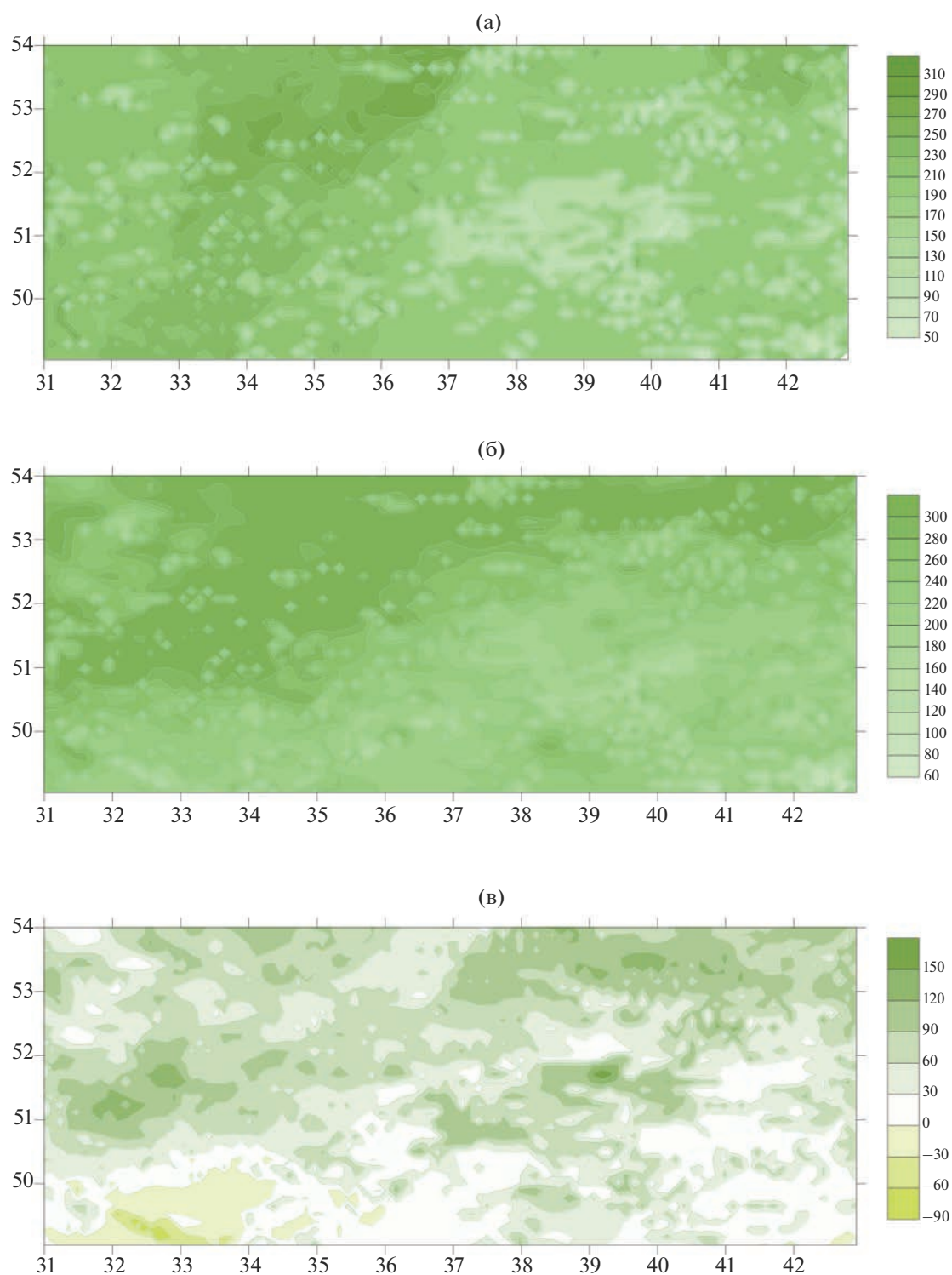


Рис. 2. Распределение по территории части ЦЧР величин влагозапасов метрового слоя почвы W , мм, на 22 августа 2017 г., рассчитанных по модели при использовании данных наземных измерений (а), при задании начального профиля влажности почвы с привлечением данных ASCAT (б) и их разности (в).

это набор результатов ассимиляции реанализа, содержащий данные ДЗЗ и наземных наблюдений за атмосферными характеристиками, радиа-

ционные данные с зондов и данные о ветре со скаттерометров. LSM Noah GLDAS вместе с тремя другими моделями — BHOA [47], ERA-Interim

TESSEL и LISFLOOD [31] — и спутниковой информацией ESA CCI использована для оценки изменчивости влажности поверхности почвы и влагозапасов ее корнеобитаемого слоя в целях сравнения с данными *in situ* в восьми пунктах аргентинской пампы [139]. Оказалось, что построенные по результатам модельных и спутниковых оценок временные распределения влажности почвы не всегда корректны, и для расширения возможностей обнаружения засух или переувлажнения при использовании LSM необходимо располагать более точными метеоданными и значениями почвенных параметров.

В работе [94] запасы почвенной влаги в корневой зоне W для глобального масштаба рассчитывались с помощью модели GLEAM при использовании балансовых уравнений по разностной схеме для последовательных почвенных уровней. Входными переменными были объем талых вод и количество дождевых осадков за вычетом объема перехваченной растениями влаги, выходными — величины испарения и инфильтрации влаги в более глубокие слои почвы. Оценки водного баланса корректировались для каждых суток с помощью фильтра Калмана для спутниковых наблюдений. Испарение рассчитывалось по формуле Пристли—Тейлора для голый почвы, невысокой (0–5, 5–100 см) и высокой (0–5, 5–100 см и 1.0–2.5 м) растительности при использовании оценок ВПП, LST , плотности растительного покрова и глубины снега, полученных по данным измерений радиометра AMSR-E/AQUA в диапазоне 36.5 ГГц с разрешением 12 км и в диапазоне 6.9 ГГц с разрешением 56 км. Осадки определялись по результатам наблюдений раз в полчаса в ИК-диапазоне геостационарных ИСЗ GOES, GMS и Meteosat для расширения объема более качественных их оценок в микроволновом диапазоне по данным сенсоров AMSU-B, SSM/I, TMI и AMSR. Набор данных о растительности VCf product сформирован по информации MODIS (пакет MOD44B). Давление воздуха вычислялось по барометрической формуле при использовании цифровой модели рельефа. Проверка оценок испарения проводилась по данным станций сети FLUXNET в Европе и США для наиболее типичных климатических условий и видов растительности. Подобный подход, основанный на применении GLEAM для оценки влагозапасов W корнеобитаемого слоя почвы и испарения ET , использован и в работе [95]. Обе величины рассчитывались с помощью уравнения водного баланса с привлечением данных о стоке с бассейнов 24 крупных рек, испарение — по формуле Пристли—Тейлора, влагозапасы — с использованием фильтра Калмана. Проверка корректности суточных оценок ET для глобального масштаба проводилась при их сравнении с соответствующими величинами из баз данных Princeton University product

и MERRA. Первые получены при использовании уравнения Пенмана—Монтейта с привлечением данных разных спутников. В основу вторых положены данные реанализа из GEOS-5 DAS NASA. По результатам расчетов для разных месяцев были построены карты испарения и транспирации для земного шара. Аналогичные оценки влагозапасов почвы W в корневой зоне и испарения, в том числе набор результатов расчетов за 36 лет (1980–2015 гг.) (v3a), были получены в работе [90] с помощью новой (v3) версии GLEAM, содержащей те же входные переменные, что и предыдущая (v2) версия модели [94], также с привлечением спутниковых данных. В версии v3 использовались формула Пристли—Тейлора, алгоритм Калман-фильтра, пакет MOD44B и другие продукты. Для низкой растительности корневая зона рассматривалась в двухслойном (0–10, 10–100 см) варианте, для высокой — в трехслойном (0–10, 10–100, 100–250 см). При трехуровневом описании расчет влагозапасов проводился с использованием разностных схем для каждого горизонта. Новые оценки величин W и ET получены при моделировании на основе данных измерений различных пассивных и активных микроволновых датчиков C- и L-диапазонов ESA CCI (для набора результатов за 2003–2015 гг., v3b) и данных ИСЗ SMOS (для аналогичного набора за 2011–2015 гг., v3c). Адекватность результатов оценок W и ET из наборов v3a, v3b и v3c подтверждена их сравнением с результатами измерений 2325 датчиков влажности почвы и потоков на 91 “flux towers” методом вихревой ковариации для разных типов ПП. Сравнение результатов оценок W из данных наборов выявило их более высокое качество, чем качество аналогичных оценок из v2. Всепогодные спутниковые данные микроволнового диапазона с высоким разрешением (100 м) были использованы в GLEAM для оценки величин ET и ВПП для Нидерландов, Фландрии и Западной Германии [89]. ВПП и LST оценивались и в меньшем масштабе с помощью модели LPRM по измерениям радиометра AMSR-2 спутника GCOM-W1. Поверхностная влажность определялась также по данным скаттерометра ASCAT/Metop-A, -B. Влагозапасы почвы в корневой зоне W рассчитывались с использованием многослойной модели водного баланса — части GLEAM, основанной на наблюдениях за осадками при ассимиляции данных о ВПП. Наборы данных, входившие в использовавшуюся версию GLEAM, включали оценки потенциальной ET с водной поверхности, низкой и высокой растительности и голый почвы с помощью уравнения Пенмана—Монтейта и констант Пристли—Тейлора. Данные о коротко- и длинноволновой радиации получены при измерениях радиометра SEVIRI ИСЗ Meteosat с разрешением 5 км, а также из архива EUMETSAT LSA-SAF; данные об альбедо — по измерениям MODIS/Terra и Aqua

с 500-метровым разрешением раз в 16 дней (пакет MCD43A3). Оценки ВПП сравнивались с измерениями *in situ* в 29 пунктах исследуемых территорий, средний коэффициент корреляции — 0.76. Сравнение результатов оценки *ET* с помощью GLEAM с данными LSA SAF показало их различие (коэффициенты корреляции — 0.65–0.95) в зависимости от видов растительности — для древесной растительности, в отличие от травянистой и кустарниковой, ошибки возрастали вследствие перехвата влаги растениями, являвшегося доминирующим процессом. Объединение информации, полученной от пассивных (AMSR-E) и активных (ASCAT) микроволновых спутниковых датчиков, позволило с помощью разработанной методологии [85] построить в глобальном масштабе более точные оценки ВПП для слоя почвы глубиной до 10 см. Такие, а также аналогичные оценки, полученные с помощью модели Noah (составной части GLDAS), сравнивались с результатами измерений ВПП *in situ*, взятыми из сетей OZNET для юго-восточной части Австралии, REMEDHUS для центральной Испании, SMOS-MANIA для южной Франции и CNR-IRP для Италии. Эти сравнения показали, что при хорошей корреляции обоих спутниковых продуктов ($R > 0.65$) их объединение увеличивает временное разрешение оценок ВПП. Кроме того, использование масштабированных оценок AMSR-E и ASCAT оказалось эффективным для регионов с редкой или умеренной растительностью. В работе [159] показано, что точность суточной оценки влажности почвы на основе совместного использования данных наблюдений за яркостной температурой с нескольких спутников в режиме, близком к реальному времени, оказывается выше точности аналогичных оценок по данным каждого из спутников. Оценки почвенной влажности строились по измерениям яркостной температуры аппаратурой SMAP, SMOS, AMSR-2, FY3B и FY3C для одного и того же дня, и затем путем осреднения этих оценок строился их ежедневный композит. Результаты сравнения объединенных оценок и оценок с каждого из спутников с данными наземных наблюдений двух сетей в Центральном Тибете и провинции Аньхой (Китай) продемонстрировали заметное повышение точности оценки влажности почвы, особенно во втором регионе. Упрощенный алгоритм определения влажности поверхности голой почвы при использовании результатов измерений радиометров L-диапазона, устанавливаемых на ИСЗ SMOS и SMAP, представлен в работе [167]. Этот алгоритм состоит из двух частей: модели поверхностного излучения с двойной поляризацией, позволяющей при искомым оценкам за счет сведений об отражательной способности поверхности уменьшить влияние ее шероховатости, и модели восстановления влажности почвы, в которой используется соотношение

между скорректированным реальным показателем преломления и объемной влажностью почвы. При этом подходе *SM* определялась с привлечением нескольких доступных входных характеристик: яркостной температуры микроволнового диапазона при двойной поляризации, температуры поверхности и содержания песка и глины в поверхностном (0–10 см) слое почвы. Результаты проведенных оценок показали хорошее согласие со значениями *SM*, рассчитанными с помощью соответствующего интегрального уравнения (значения *RMSE* составили <3% при всех углах падения). Последующая проверка алгоритма на данных четырехлетних экспериментов с излучением в L-диапазоне, проведенных в BARC, дала *RMSE* 4.3 и 3.4% при углах падения в 40° и 50° соответственно. Алгоритм продемонстрировал также высокую эффективность для радиометров L-диапазона с большим углом падения, установленных на SMAP.

*Оценки влажности поверхности почвы
при использовании нейронных сетей*

Оценки ВПП по данным ИСЗ могут быть получены и с использованием нейронных сетей NN [100, 121, 156]. В работе [121] набор этих оценок по данным SMOS был выбран в качестве эталона при обучении NN для получения глобальной нелинейной зависимости (поиска глобальной нелинейной регрессии), связывающей яркостные температуры T_{br} , измеренные радиометром AMSR-E, с набором данных SMOS за период одновременной миссии в 1.5 года, после чего построенная сеть использовалась для расчета значений ВПП по прошлым наблюдениям AMSR-E. Чувствительность T_{br} AMSR-E к изменениям температуры почвы оценивалась с помощью информации из баз данных ERA-Land и MERRA-Land. Одна из сетей, в которой использовались данные C- и X-диапазонов AMSR-E и информация о почвах, была выбрана для получения оценок ВПП за 2003–2011 гг. Этот набор оценок показал малые смещения ($<0.02 \text{ м}^3/\text{м}^3$) и стандартные отклонения ($<0.04 \text{ м}^3/\text{м}^3$) от данных SMOS на большей части поверхности земного шара. Оценки ВПП из данного набора, а также из наборов AMSR-E, SM CCI, MERRA-Land и ERA-Land сравнивались с большим количеством результатов измерений *in situ* на четырех континентах. Хорошие совпадения с натурными данными были получены для Австралии, результаты расчетов оказались применимы для Европы, горных районов Северной Америки и в гораздо меньшей степени для региона Сахели. Они также продемонстрировали значительную погрешность для регионов тропических и бореальных лесов. Аналогичный подход был реализован и в работе [156], в которой нейронные сети обратного распространения BPNN

использовались для восстановления долгосрочного временного ряда значений ВПП с помощью полученных по спутниковым данным оценок микроволнового индекса растительности *MVI*. Здесь обучение BPNN для каждого пиксела сетки проводилось для двух лет при использовании данных о ВПП со SMOS уровня 3 (SMOSL3sm) в качестве цели обучения с учетом коэффициентов отражения R_s в диапазонах C/X/Ku/Ka/Q, а также *MVI* из данных радиометров AMSR-E и AMSR-2 в качестве входных характеристик, где *MVI* привлекался для корректировки влияния растительности. При этом значения R_s и *MVI* определялись по связям с яркостной температурой T_{br} , измеренной AMSR-E и AMSR-2. Точность обучения сетей оценивалась путем сравнения значений ВПП, полученных с использованием BPNN (NN sm), со SMOSL3sm в течение периода обучения BPNN, по коэффициентам корреляции (~ 0.67), смещению ($\sim -0.0005 \text{ м}^3/\text{м}^3$) и среднеквадратичной ошибке RMSE ($\sim 0.055 \text{ м}^3/\text{м}^3$). Хорошие результаты глобального масштаба были получены для Австралии, Центральной части США и Центральной Азии. С помощью обученных сетей по каждому пикселу по данным AMSR-E были построены глобальные временные ряды ВПП за период 2003–2011 гг. и по данным AMSR-2 TB за период 2012–2015 гг., после чего продукты NN sm были оценены при сравнении с данными наблюдений *in situ* за ВПП на всех участках сети SCAN. В работе [100] обоснована возможность оценки влажности поверхности голой почвы с помощью NN при использовании данных радара IC3 Sentinel-1B. NN рассматривались здесь как способ построения регрессионной связи коэффициентов обратного рассеяния, определяемых при измерениях Sentinel, и поляриметрических характеристик рассеяния — анизотропии и энтропии — с отражательной способностью ПП. (Влажность и шероховатость поверхности почвы являются основными характеристиками, влияющими на данный коэффициент [106]). Искомые значения влажности определялись при использовании полученных данных об отражательной способности почвы. Оценки влажности поверхностного (0–5 см) слоя почвы с помощью предложенного метода для сельскохозяйственного поля под паром с голой почвой в одном из сел Красноярского края РФ дали среднеквадратичную ошибку $\geq 3\%$ и коэффициент детерминации ≤ 0.726 [100].

Оценки влажности почвы для условий засухи

В работах [78, 146] *SM* оценивалась на основе ее связи с индексом водного дефицита *WDI* и осадками. *WDI* рассчитывалась как комбинация разностей значений температуры ПП и воздуха, полученных при использовании их зависимости от определенного по данным MODIS проектив-

ного покрытия ($LST \sim VI$), в форме трапецоида с вершинами, соответствовавшими сухой и насыщенной голой почве, растительности в состоянии водного стресса и хорошо увлажненной. Эти разности строились для каждого пиксела с привлечением уравнения энергетического баланса, где потоки скрытого и явного тепла вычислялись с использованием данных о метеорологических характеристиках, в том числе о температуре воздуха, солнечной радиации, скорости ветра и удельной влажности воздуха, результатов расчета поверхностного и аэродинамического сопротивлений, а также данных MODIS об альбедо и *LAI*. По рассчитанным значениям разностей температуры проводились границы трапецоида для сухого и влажного состояний ПП. Значения метеорологических характеристик в [146] получены по данным непосредственных измерений на метеостанциях, а в [78] — загружены из базы данных CLDAS. При использовавшемся подходе среднеквадратичная ошибка оценки влажности почвы относительно измерений на разных глубинах варьировала в пределах $0.067\text{--}0.079 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Изменения ВПП в глобальном масштабе за последние 40 лет были прослежены по данным ESA CCI (для слоя 0–5 см), GLDAS-Noah (для слоя 0–10 см) и ERA-Interim (для слоя 0–7 см), последние были наиболее близки к фактическим [38]. Авторы отмечают заметное снижение среднемировых показателей ВПП в 1979–2017 гг. и усиление тенденции к снижению в 2001–2017 гг., иллюстрируя их глобальными картами ВПП. Высыхание было обнаружено для почв с семью основными типами землепользования, наибольшая доля среди которых ($\sim 80\%$) приходилась на городские территории. При этом в 65% случаев высыхания почвы оно было связано с повышением температуры, тогда как в 82% случаев увлажнения этот процесс был обусловлен комбинированным действием температуры, осадков и увеличением площади растительности, характеризуемым *NDVI*. В условиях глобального потепления площадь высыхания почвы в 1979–2017 гг. увеличивалась со скоростью 1% в год. В работе [104] получены количественные оценки взаимосвязи между влажностью почвы *SM* при засухе, определявшейся по спутниковым данным, и температурой, осадками, суммарным испарением и характеристиками растительности на пике вегетационного периода для глобального масштаба. Значения *SM* были получены по данным ESA-CCI и ERA-Interim/Land, значения эвапотранспирации *ET* — по данным GLEAM, значения температуры и осадков — по данным ERA-Interim (ERA-Tx и ERA-P) (все с разрешением 0.25° , ежедневно, за тридцать с лишним лет), значения *NDVI* — по данным AVHRR/NOAA с разрешением $(1/12)^\circ$ раз в две недели, значения *LAI* и *PAR* — по данным MODIS с разрешением 1 км раз в 8 дней и данные о по-

крытости растительностью — по данным ESA CCI. Определенные по спутниковым данным из ESA CCI значения SM при засухе сравнивались с ее аналогичными значениями, полученными по данным ERA-Interim, а также с помощью LSM и при использовании информации многочастотного радиометра об индексе осадков SPI для территорий всех континентов. Для разных участков этих территорий для пиков засух описаны особенности связей SM с температурой, осадками, величинами ET и площади покрытости растительностью. Подобный подход открывает возможности мониторинга засух для больших пространственных и временных масштабов при использовании спутниковых данных. Надо отметить, что для прослеживания долгосрочной динамики водного, энергетического и углеродного циклов над поверхностью суши Европейское космическое агентство ESA в рамках своей программы CCI в 2012 г. выложило в доступ первый многолетний набор глобальных спутниковых данных о влажности почвы SM , ESA CCI SM . Этот набор объединил разные активные и пассивные микроволновые продукты влажности почвы, сформированные с помощью одного датчика, в три гармонизированных продукта — объединенные активный, пассивный и комбинированный активный + пассивный микроволновые продукты [40]. По сравнению с первым выпуском данного набора последняя (на 2019 г.) версия ESA CCI SM включает большое количество улучшений и данные нескольких новых спутниковых сенсоров при расширении своего временного покрытия до интервала 1978–2018 гг. [53]. В работе [148] при использовании данных ДЗЗ разработан индекс засушливости $TVPDI$, являющийся, по мнению авторов, более совершенным индикатором иссушения земной поверхности, чем связанные с количеством осадков P температура LST и с состоянием растительности — влажность почвы SM (из-за взаимодействия между названными вероятными первопричинами засухи). Обоснование возможности использования этого индекса опиралось на его сравнение с информацией о SM , P , $NDVI$, LST , других индексах засушливости, а также об урожайности на единицу площади и о чистой первичной продуктивности NPP (соответствующий анализ был произведен для разных пространственных масштабов). Оценки $TVPDI$ при засухе оказались более точными, чем результаты использования P , $NDVI$ и LST , при этом коэффициент корреляции $TVPDI$ с SM оказался >0.64 . Временные ряды $TVPDI$ показали хорошую согласованность по пространству с другими индексами сухости и по времени — с урожайностью на единицу площади и NPP для большинства регионов Китая. Оценки $TVPDI$ по данным MODIS соответствовали также аналогичным оценкам, полученным по данным Landsat. В итоге использование

$TVPDI$ для мониторинга засушливых и увлажненных территорий в Китае позволило фиксировать заметные пространственно-временные различия состояний сухости—влажности как в месячном, так и в годовом масштабах.

Оценки влажности почвы при использовании новых перспективных спутниковых сенсоров микроволнового диапазона

В последние несколько лет были проведены комплексные (самолетные и наземные) эксперименты по испытанию микроволновой аппаратуры, планируемой к установке на новые космические платформы. Так, работа [164] посвящена получению оценок ВПП по данным измерений установленного на самолете микроволнового радиометра L-диапазона с синтезированной апертурой, выполнявшего зондирование земной поверхности при переменных углах падения и наменного к эксплуатации на спутниках WCOM [135, 136] и TWRS [166]. В работе [164] исследованы зависимость результатов оценки ВПП от этих углов в соответствовавших разным поляризациям алгоритмах, использовавшихся для расчета значений яркостной температуры и ВПП, и в модели LPRM, а также оценено влияние растительности и шероховатости ПП на точность результатов данных расчетов. Эти результаты сравнивались с данными наземных измерений SM и температуры, при этом для разных поляризаций выявлен диапазон углов, позволяющих получить оптимальные оценки ВПП. В работах [165, 166] представлены результаты аналогичных исследований, проводившихся с целью тестирования аппаратуры микроволнового L-диапазона для спутника TWRS и направленных на увеличение пространственного разрешения и на повышение точности картографирования ВПП путем совместного использования данных активного и пассивного ДЗЗ в L-диапазоне [166], в L-, C- и X-диапазонах [165], а также данных оптического диапазона. В обеих работах оценки ВПП для слоя 0–5 см, полученные при использовании самолетных данных разного разрешения (бортового радиометра и радара) для разных углов и частот зондирования, сравнивались с результатами наземных измерений влажности и температуры почвы на двух сетях (в бассейнах двух рек Внутренней Монголии (Китай)). Выявлена большая пространственная изменчивость как значений температуры, так и ВПП для разных типов землепользования (пахотных земель, зерновой и травяной растительности) [166]. В работе [165] показано, что различия яркостной температуры для соседних частот L- и C-, а также C- и X-диапазонов обусловлены различиями значений ВПП, в то время как расхождения значений яркостной температуры при разных углах падения в основном связаны с разным влагосодер-

жанием растительности. По мнению авторов, увеличение количества каналов наблюдений позволяет получать более надежные оценки ВПП при разрешении сенсора L-диапазона в ~ 18 км.

Анализ возможных ошибок оценки влажности почвы по данным ИСЗ

Трудности оценки влажности почвы *SM* по данным SAR высокого разрешения заключаются в основном в необходимости обеспечения точной параметризации шероховатости почвы, учета влияния угла наблюдения и непрерывности самих данных. Для использования существующих наборов оценок *SM* по микроволновым данным с низким разрешением за продолжительное время, например с веб-сайта ESA CCI *SM*, требуется привлечение алгоритмов уменьшения масштаба для увеличения пространственного разрешения оценок из этих наборов. В дополнение к данным таких микроволновых измерений, результаты наблюдений диапазонов VNIR использовались либо для уменьшения масштабов оценки влажности почвы по микроволновым данным, либо для прямого определения ее значений. К преимуществам измерений диапазонов VNIR относятся их очень высокое разрешение — как пространственное (10 м для Sentinel-2), так и временное (менее суток для геостационарных спутников) [113]. К примеру, в работе [122] проведено обсуждение результатов оценки ВПП по микроволновым данным SAR и радиометров ИСЗ SMAP и SMOS при уменьшении масштаба, по информации диапазонов VNIR Landsat-8 OLI и MODIS, при использовании методов передискретизации (изменений разрешения изображений в пикселах), по данным самолетных измерений с помощью радиометра PLMR и скаттерометра PLIS в рамках проектов SMAPEx-4,-5 [157] и наземных измерений *in situ* и сети OzNet на сельскохозяйственной территории Янко (Yanko) в Новом Южном Уэльсе (Австралия).

Исследование особенностей ошибок оценки ВПП с использованием данных ДЗЗ, проведенное в работе [151], имело целью совершенствование способов оптимального усвоения таких оценок в гидрологических моделях. Авторами рассмотрены различия неизменных во времени и суточных ошибок оценки ВПП по измерениям ASCAT и SMAP и проведен анализ корреляции названных ежедневных ошибок с количественной оценкой биомассы растений по листовому индексу *LAI* и количеству осадков. В тропических регионах разница между неизменными во времени и суточными ошибками велика в сухой сезон и становится небольшой при наступлении сезона дождей. Для большей части поверхности суши ежедневные ошибки показывают более сильную корреляцию с осадками, чем с *LAI*. В областях с

низким растительным покровом, в том числе для бесплодных земель, лугов и открытых кустарников пики дождей совпадают с пиками ошибок оценки ВПП, а пики значений *LAI* во всех случаях достигаются после прохождения пиков ошибок ВПП. Таким образом, временная изменчивость ошибок оценки влажности почвы больше обусловлена осадками, чем изменениями *LAI*.

Оригинальный способ оценки влажности поверхностного слоя почвы — с использованием данных навигационной системы GNSS — предложен в работе [81]. Учитывая уменьшение амплитуды преломленного почвой луча, авторы построили полиномиальную регрессионную связь отношения этой амплитуды к амплитуде падающего луча с влажностью поверхностного (3.5 см) слоя и его температурой. Вид этой связи был подобран при ее калибровке по данным измерений 18 ИСЗ за 62 дня из общей их продолжительности в 241 день. Коэффициент корреляции оказался равным 0.947, а значение RMSE — $0.013 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (1.3%) при разбросе значений ВПП между 0.272 и $0.489 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Представляется, что данный подход требует дальнейшей проработки, в частности — проведения большего числа измерений и детальной проверки точности результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзоре приведены полученные при использовании данных ДЗЗ разных спектральных диапазонов результаты оценки эвапотранспирации, а также влажности поверхности почвы ВПП и влагозапасов ее деятельного слоя *W* как элементов влажностного и теплового режимов территорий, различных по масштабам — от локального до глобального. В рамках такого подхода представлена ретроспектива исследований процессов влаго- и теплообмена участков суши с атмосферой (путем проведения полевых гидролого-атмосферных экспериментов, регулярного сбора информации о ПП и приземном слое атмосферы и разработки моделей названных процессов) с середины 1980-х гг. до настоящего времени. Также сделан обзор баз наземных, спутниковых и модельных данных (глобальных, региональных, местных), накопленных при этих исследованиях.

Значительное внимание в работе уделено результатам определения ВПП и *W* с привлечением данных микроволнового диапазона, в том числе полученных с помощью SAR — как одного из наиболее эффективно развивающихся направлений оценки названных величин, являющихся характеристиками водообеспеченности исследуемых территорий. Проанализированы результаты применения таких данных в разных физико-географических условиях. Приведены оценки ВПП, полученные при использовании нейрон-

ных сетей. Рассмотрены вопросы использования данных ДЗЗ для оценки влажности почвы при условиях засухи.

Обрисованы перспективы развития спутниковых технологий для получения оценок характеристик ПП и метеорологических характеристик, используемых при расчетах влажности почвы и других элементов водного и теплового режимов — разработка новой мультиспектральной аппаратуры высокого разрешения, создание обширных баз данных, в том числе облачных, методов их обработки и ассимиляции в моделях. Также кратко описано одно из новых перспективных направлений получения дистанционной информации с помощью большого количества микроспутников малых размеров и веса с обладающими высокой разрешающей способностью сенсорами диапазонов как VNIR, так и микроволнового. Эти микроспутники характеризуются высокой (несколько раз в сутки) повторяемостью обращения.

Представленный обзор может быть полезен для исследователей, занимающихся моделированием процессов влаго- и теплообмена для территорий, находящихся в разных природных зонах, а также получением оценок влажности почвы и испарения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 66–74.
2. Волкова Е.В. Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9,-10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 163–177.
3. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным сканирующих радиометров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников // Исследование Земли из космоса. 2015. № 5. С. 40–43.
4. Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 291–303.
5. Кабелва Х.А. ЕСОCLIMAP — база данных для блока подстилающей поверхности ISBA в моделях атмосферы // Учен. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2006. № 3. С. 54–60.
http://elibrshu.ru/files_books/pdf/3-5.pdf
6. Митник Л.М., Митник М.Л., Заболотских Е.В. Спутник Японии GCOM-W1: моделирование, калибровка и первые результаты восстановления параметров океана и атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 135–141.
7. Мотовилов Ю.Г., Старцева З.П. Численное моделирование влагообмена между деятельным слоем почвы и атмосферой // Метеорология и гидрология. 1985. № 6. С. 85–3.
8. Музылев Е.Л., Старцева З.П., Зейлигер А.М., Ермолаева О.С., Волкова Е.В., Василенко Е.В., Осипов А.И. Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 44–60.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-44-60>
9. 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 при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 108–136.
10. Соловьев В.И., Успенский А.Б., Успенский С.А. Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. 2010. № 3. С. 5–17.
11. Успенский А.Б., Щербина Г.И. Оценка температуры и излучательной способности поверхности суши по данным измерений уходящего теплового излучения с ИСЗ NOAA // Исследование Земли из космоса. 1996. № 5. С. 4–13.
12. Abid N., Mannaerts C., Bargaoui Z. Sensitivity of actual evapotranspiration estimation using the SEBS model to variation of input parameters (LST, DSSF, aerodynamics parameters, LAI, FVC) // ISPRS Geospatial Week, Enschede, Netherlands, 2019. The Intern. Archives of the Photogrammetry. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2019. V. XLII-2/W13. P. 1193–1200.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1193-2019>
13. Anderson M.C., Norman J.M., Diak G.R., Kustas W.P., Mecikalski J.R. A Two-Source Time-Integrated Model for Estimating Surface Fluxes Using Thermal Infrared Remote Sensing // Remote Sens. Environ. 1997. V. 60. № 2. P. 195–216.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5)
14. André J.-C., Goutorbe J.-P., Perrier A. HAPEX—MOBLIH: A Hydrologic Atmospheric Experiment for the Study of Water Budget and Evaporation Flux at the Climatic Scale // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1986. V. 67. № 2. P. 138.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1986\)067<0138:HAHAEF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1986)067<0138:HAHAEF>2.0.CO;2)
15. Andreassian V., Bergström S., Chahinian N., Duan Q., Gusev Y.M., Littlewood 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 V. Andreassian, A. Hall, N. Chahinian, J. Shaake. Wallingford, UK: IAHS Press, 2006. № 307. P. 41–93.
16. Angelini L.P., Biudes M.S., Machado N.G., Geli H.M.E., Vourlitis G.L., Ruhoff A., de Souza Nogueira J. Surface Albedo and Temperature Models for Surface Energy Balance Fluxes and Evapotranspiration Using SEBAL and Landsat 8 over Cerrado-Pantanal, Brazil // *Sensors*. 2021. V. 21. P. 7196. <https://doi.org/10.3390/s21217196>
 17. Attema E., Cafforio C., Gottwald M., Guccione P., Monti-Guarnieri A., Rocca F., Snoeij P. Flexible dynamic block adaptive quantization for Sentinel-1 SAR missions // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2010. V. 7. № 4. P. 766–770.
 18. Attema E., Snoeij P., Monti-Guarnieri A., Rocca F., Guccione P., D'Aria D., Croci R., Olanda A. Sentinel-1 Flexible Dynamic Block Adaptive Quantizer // Conference Paper. EUSAR 2010. Aachen, Germany, 2010. P. 344–349. <https://www.researchgate.net/publication/224233683>
 19. Bartalis Z., Wagner W., Naeimi V., Hasenauer S., Scipal K., Bonekamp H., Figa J., Anderson C. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT) // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. № 20. L20401. <https://doi.org/10.1029/2007GL031088>
 20. Bastiaanssen W.G.M., Menenti M., Feddes R.A., Holtlag A.A.M. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). Pt 1. Formulation // *J. Hydrol.* 1998. V. 212–213. P. 198–212.
 21. Bastiaanssen W.G.M., Pelgrum H., Wang J., Ma Y., Moreno J.F., Roerink G.J., van der Wal T. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). Pt 2. Validation // *J. Hydrol.* 1998. V. 212–213. P. 223–229.
 22. Bezerra B.G., Silva B.B., Santos C.A.C., Bezerra J.R.C. Actual evapotranspiration estimation using remote sensing: comparison of SEBAL and S5EB approaches // *Adv. Remote Sens.* 2015. V. 4. № 3. P. 234–247.
 23. Biancamaria S., Lettenmaier D.P., Pavelsky T.M. The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology // *Surv. Geophys.* 2016. V. 37. P. 307–337.
 24. Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHC) // Operation Plan / Rep. No. 27. Core Project Office. Berlin, Germany: Institut für Meteorologie, Freie Univ. Berlin, 1993. P. 1–103.
 25. Blyth E.M., Arora V.K., Clark D.B., Dadson S.J., De Kauwe M.G., Lawrence D.M., Melton J.R., Pongratz J., Turton R.H., Yoshimura K., Yuan H. Advances in Land Surface Modelling // *Current Clim. Change Rep.* 2021. V. 7. P. 45–71.
 26. Bolle H.J. Identification and observation of desertification processes with the aid of measurements from space: Results from the European Field Experiment in Desertification-threatened Areas (EFEDA) // *Desertification in Developed Countries* / Eds D.A. Mouat, S.F. Hutchinson. Amsterdam, Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1995. P. 93–101. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1635-7_7
 27. Bolle H.J., André J.C., Arrue J.L., Barth H.K., Bessemoulin P., Brasa A., de Bruin H.A.R., Cruces J., Dugdale G., Engman E.T., Evans D.L., Fantechi R., Fiedler F., van de Griend A., Imeson A.C., Jochum A., Kabat P., Kratzsch T., Lagouarde J.P., Langer I., Llamas R., Lopez-Baeza E., Melia Miralles J., Muniosguren L.S., Nerry F., Noilhan J., Oliver H.R., Roth R., Saatchi S.S., Sanchez Dias J., de Santa Olalla M., Shuttleworth W.J., Soegaard H., Stricker J., Thornes J., Vauclin M., Wickland D. EFEDA: European field experiment in a desertification-threatened area // *Ann. Geophysicae*. 1993. V. 11. P. 173–189.
 28. Brocca L., Hasenauer S., Lacava T., Melone F., Moramarco T., Wagner W., Dorigo W., Matgen P., Martínez-Fernández J., Llorens P., Latron J., Martin C., Bitte M. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe // *Remote Sens. Environ.* 2011. V. 115. № 12. P. 3390–3408.
 29. Brown de Colstoun E.C., Defries R.S., Townshend J.R.G. Evaluation of ISLSCP Initiative II satellite-based land cover datasets and assessment of progress in land cover data for global model // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D22S07. <https://doi.org/10.1029/2006JD007453>
 30. Brun P., Zimmermann N.E., Hari C., Pellissier L., Karger D.N. Global climate-related predictors at kilometer resolution for the past and future // *Earth Syst. Sci. Data*. 2022. V. 14. P. 5573–5603. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5573-2022>
 31. Burek P., van der Knijff J., de Roo A. LISFLOOD – Distributed Water Balance and Flood Simulation Model // Revised User Manual 2013. JCR Technical Report EUR 26162. Luxembourg: Luxembourg Publ. Office Eur. Union, 2013. 142 P. JRC78917. <https://doi.org/10.2788/24982>
 32. Cammalleri C., Anderson M.C., Gao F., Hain C.R., Kustas W.P. Mapping daily evapotranspiration at field scales over rainfed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion // *Agric. Forest Meteorol.* 2014. V. 186. P. 1–11.
 33. Cenci L. Soil Moisture-Data Assimilation for Improving Flash Flood Predictions in Mediterranean Catchments. Case Study: ASCAT and Sentinel 1 Derived Products. Ph. D Thesis. Pavia: Scuola Universitaria Superiore IUSS, 2016. 123 p.
 34. Cenci L., Laiolo P., Gabellani S., Campo L., Silvestro F., Delogu F., Boni G., Rudari R. Assimilation of H-SAF Soil Moisture Products for Flash Flood Early Warning Systems. Study case: Mediterranean Catchments // *IEEE J. Select. Topics Appl. Earth Observ. Rem. Sens.* 2016. V. 9. № 12. P. 5634–5646. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2598475>
 35. Chen F. The Noah Land Surface Model in WRF. A short tutorial // LSM group meeting, 2007. NCAR, RAL, TIIMES, 2007. <https://www.atmos.illinois.edu/~snesbitt/ATMS597R/notes/noahLSM-tutorial.pdf>
 36. Cooley S.W., Ryan J.C., Smith L.C. Human alteration of global surface water storage variability // *Nature*. 2021. V. 591. P. 78–81. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03262-3>
 37. Dai A. Historical and Future Changes in Streamflow and Continental Runoff: Natural and Human-

- Induced Impacts: a review // *Terrestrial Water Cycle and Climate Change* / Eds Q. Tang, T. Oki. Geophysical Monograph Ser. Wiley. 2016. Chapter 2. P. 17–37. <https://doi.org/10.1002/9781118971772.ch2>
38. Deng Y., Wang S., Bai X., Luo G., Wu L., Cao Y., Li H., Li C., Yang Y., Hu Z., Tian S. Variation trend of global soil moisture and its cause analysis // *Ecol. Indicators*. 2020. V. 110. 105939. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105939>
 39. Dickinson R.E. Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models // *Climate Processes and Climate Sensitivity* / Eds J.E. Hanson, T. Takahashi. Geophys. Monogr. Ser. Amer. Geophys. Union. Washington, D. C., USA, 1984. V. 29. P. 58–72.
 40. Dorigo W., Wagner W., Albergel C., Albrecht F., Balsamo G., Brocca L., Chung D., Ertl M., Forkel M., Gruber A., Haas E., Hamer P.D., Hirschi M., Ikonen J., de Jeu R., Kidd R., Lahoz W., Liu Y.Y., Miralles D., Mistelbauer T., Nicolai-Shaw N., Parinussa R., Pratola C., Reimer C., van der Schalie R., Seneviratne S.I., Smolander T., Lecomte P. ESA CCI soil moisture for improved earth system understanding: state-of-the art and future directions // *Remote Sens. Environ.* 2017. V. 203. P. 185–215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>
 41. Dorigo W.A., Wagner W., Hohensinn R., Hahn S., Paulik C., Xaver A., Gruber A., Drusch M., Mecklenburg S., van Oevelen P., Robock A., Jackson T. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 1675–1698. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1675-2011>
 42. Duan Q., Schaake J., Andreassian V., Franks S., Goteti G., Gupta H.V., Gusev Y.M., Habets F., Hall A., Hay L., Hogue T., Huang M., Leavesley G., Liang X., Nasonova O.N., Noilhan J., Oudin L., Sorooshian S., Wagener T., Wood E.F. Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops // *J. Hydrol.* 2006. V. 320. P. 3–17.
 43. Durand M., Gleason C.J., Garambois P.A., Bjerklie D., Smith L.C., Roux H., Rodriguez E., Bates P.D., Pavelsky T.M., Monnier J., Chen X., Di Baldassarre G., Fiset J.-M., Flipo N., Frasson R.P.d.M., Fulton J., Goutal N., Hossain F., Humphries E., Minear J.T., Mukolwe M.M., Neal J.C., Ricci S., Sanders B.F., Schumann G., Schubert J.E., Vilmin L. An intercomparison of remote sensing river discharge estimation algorithms from measurements of river height, width, and slope // *Water Resour. Res.* 2016. V. 52. P. 4527–4549. <https://doi.org/10.1002/2015WR018434>
 44. Entekhabi D., Njoku E.G., O'Neill P.E., Kent H., Kellogg K.H., Crow W.T., Edelstein W.E., Entin J.K., Goodman S.D., Jackson T.J., Johnson J., Kimball J., Piepmeier J.R., Koster R.D., Martin N., McDonald K.C., Moghaddam M., Moran S., Reichle R., Shi J.C., Spencer M.W., Thurman S.W., Tsang L., Van Zyl J. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission // *Proc. IEEE*. 2010. V. 98. № 5. P. 704–716.
 45. FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC // Harmonized World Soil Database (version 1.2). Rome-Laxenburg: FAO, 2012. 43 p.
 46. Faroux S., Kaptué Tchuenté A.T., Roujean J.-L., Masson V., Martin E., Le Moigne P. ECOCLIMAP-II/ Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models // *Geosci. Model Dev.* 2013. № 6. P. 563–582. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-563-2013>
 47. Fernández-Long M.E., Spescha L., Barnatán I., Murphy G. Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). Rev. // *Agronomía Ambiente*. Buenos Aires, Argentina: Facultad de Agronomía UBA, 2012. V. 32. № 1–2. P. 31–47.
 48. Fisher R.A., Koven C.D. Perspectives on the Future of Land Surface Models and the Challenges of Representing Complex Terrestrial Systems // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2020. V. 12. № 4. e2018MS001453. <https://doi.org/10.1029/2018MS001453>
 49. French A.N., Hunsaker D.J., Thorp K.R. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models // *Rem. Sens. Environ.* 2015. V. 158. P. 281–294.
 50. Global Climate Observing System (GCOS). <https://gcos.wmo.int/en/home>
 51. Goutorbe J.P., Lebel T., Dolman A.J., Gash J.H.C., Kabat P., Kerr Y.H., Monteny B., Prince S.D., Stricker J.N.M., Tinga A., Wallace J.S. An overview of HAPEX-Sahel: a study in climate and desertification // *J. Hydrol.* 1997. V. 188–189. P. 4–17. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03308-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03308-2)
 52. GRACE-FO. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/grace-fo>
 53. Gruber A., Scanlon T., van der Schalie R., Wagner W., Dorigo W. Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology // *Earth Syst. Sci. Data*. 2019. V. 11. P. 717–739. <https://doi.org/10.5194/essd-11-717-2019>
 54. Häflliger V., Martin E., Boone A., Ricci S., Biancamaria S. Assimilation of Synthetic SWOT River Depths in a Regional Hydrometeorological Model // *Water*. 2019. V. 11. № 1. P. 78.
 55. Houser P.R., De Lannoy G.J.M., Walker J.P. Hydrologic Data Assimilation // *Approaches to Managing Disaster. Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts* / Ed. J. Tiefenbacher. Rijeka, Croatia: InTechOpen, 2012. Chapter 3. P. 41–65.
 56. H-SAF 2016. ASCAT H-SAF. <http://hsaf.meteoam.it/> (дата обращения: 24.03.2016)
 57. Huffman G.J., Adler R.F., Morrissey M.M., Bolvin D.T., Curtis S., Joyce R., McGavock B., Susskind J. Global precipitation at one-degree daily resolution from multi-satellite observations // *J. Hydrometeorol.* 2001. V. 2. P. 36–50. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2001\)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2g](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2001)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2g)
 58. Huffman G.J., Bolvin D.T. Version 1.2. GPCP One-Degree Daily Precipitation Data Set Documentation. 2012. https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/gpcp/daily-v1.2/documentation/1DD_v1.2_doc.pdf

59. Hutjes R.W.A., Kabat P., Running S.W., Shuttleworth W.J., Field C., Bass B., da Silva Dias M.F., Avissar R., Becker A., Claussen M., Dolman A.J., Feddes R.A., Fosberg M., Fukushima Y., Gash J.H.C., Guenni L., Hoff H., Jarvis P.G., Kayane I., Krenke A.N., Liu C., Meybeck M., Nobre C.A., Oyebande L., Pitman A., Pielke Sr. R.A., Raupach M., Saugier E.D., Schulze E.D., Sellers P.J., Tenhunen J.D., Valentini R., Victoria R.L., Vörösmarty C.J. Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle // *J. Hydrol.* 1998. V. 212–213. № 14. P. 1–21.
60. ICESat2 mission. <http://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat2/>
61. ICESat2. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/icesat-2>
62. IGBP igbp.net
63. ISD <https://www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/integrated-surface-database>
64. ISLSCP Initiative II Collection. Data set / Eds F.G. Hall, G.J. Collatz, B.W. Meeson, S.O. Los, E. Brown De Colstoun, D.R. Landis. Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.: Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, 2011. <http://daac.ornl.gov/>. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1001>
65. ISMN <http://www.ipf.tuwien.ac.at/insitu>
66. Karger D.N., Conrad O., Böhner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R.W., Zimmermann N.E., Linder P., Kessler M. Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas // *Sci. Data.* 2017. V. 4. 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
67. Kawanishi T., Sezai T., Ito Y., Imaoka K., Takeshima T., Ishido Y., Shibata A., Miura M., Inahata H., Spencer R.W. The Advanced AMSR-E. NASDA's contribution to the EOS for Global Energy and Water Cycle Studies // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. V. 41. P. 184–194.
68. Kerr Y.H., Imbernon J., Dedieu G., Hautecoeur O., Lagouarde J.-P., Seguin B. NOAA AVHRR and Its Uses for Rainfall and Evapotranspiration Monitoring // *Int. J. Remote Sens.* 1989. V. 10. P. 847–854. <https://doi.org/10.1080/01431168908903925>
69. Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proc. IEEE.* 2010. V. 98. № 5. P. 666–687.
70. Krenke A.N., Green A.M., Georgiadi A.G. KUREX-88 – Hydrology in atmospheric processes experiment // *Proc. Ljubljana Symp. IAHS Publ.* 1990. № 191. P. 5.1–5.17.
71. Kuchment L.S., Startseva Z.P. Sensitivity of evapotranspiration and soil moisture in wheat fields to changes in climate and direct effects of carbon dioxide // *Hydrol. Sci. J.* 1991. V. 36. № 6. P. 631–643.
72. KUREX-91 / Eds N.S. Goel, V. Kozoderov, D. Deering // *Rem. Sens. Rev. Amsterdam, Netherlands: Harwood Acad. Publ.* 1998. V. 17. № 1–4. 336 p.
73. Laiolo P., Gabellani S., Campo L., Cenci L., Svestro F., Delogu F., Boni G., Rudari R., Puca S., Pisani A.R. Assimilation of Remote Sensing Observations into a Continuous Distributed Hydrological Model: Impacts on the Hydrological Cycle // *Conference Paper. IGARSS-2015.* New York, USA: IEEE Publ., 2015. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326015>
74. Landsat <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-data-access>
75. Landsat-9 <https://landsat.gsfc.nasa.gov/data/>
76. Landsat 9. Data Users Handbook. Version 1.0. February 2022. LADS-2082 // Sioux Falls. South Dakota, USA: EROS Center, 2022.
77. LCD <https://www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/local-climatological-data>
78. Leng P., Li Z.-L., Duan S.-B., Gao M.-F., Huo H.-Y. A practical approach for deriving all-weather soil moisture content using combined satellite and meteorological data // *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens.* 2017. V. 131. P. 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.013>
79. Levizzani V., Cattani E. Satellite Remote Sensing of Precipitation and the Terrestrial Water Cycle in a Changing Climate // *Remote Sens.* 2019. V. 11. № 19. P. 2301.
80. Li X., Xin X., Peng Z., Zhang H., Li L., Shao S., Liua Q. Estimation of land surface heat fluxes based on visible infrared imaging radiometer suite data: case study in northern China // *J. Appl. Rem. Sens.* 2017. V. 11. № 4. 046012. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.046012>
81. Li Y., Yu K., Li J., Jin T., Chang X., Zhang Q., Yang S. Measuring Soil Moisture with Refracted GPS Signals // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2022. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3161409>
82. Li Z., Liu X., Ma T., Kejia D., Zhou Q., Yao B., Niu T. Retrieval of the surface evapotranspiration patterns in the alpine grassland–wetland ecosystem applying SEBAL model in the source region of the Yellow River, China // *Ecol. Model.* 2013. V. 270. P. 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.09.004>
83. Liang S., Cheng C., Jia K., Jiang B., Liu Q., Xiao Z., Yao Y., Yuan W., Zhang X., Zhao X., Zhou J. The Global LAnd Surface Satellite (GLASS) products suite // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2020. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0341.1>
84. Liang S., Zhao X., Liu S., Yuan W., Cheng X., Xiao Z., Zhang X., Liu Q., Cheng J., Tang H., Qu Y., Bo Y., Qu Y., Ren H., Yu K., Townshend J. A long-term Global LAnd Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies // *Intern. J. Digital Earth.* <https://doi.org/10.1080/17538947.2013.805262>
85. Liu Y.Y., Parinussa R.M., Dorigo W.A., De Jeu R.A.M., Wagner W., van Dijk A.I.J.M., McCabe M.F., Evans J.P. Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 425–436. <https://doi.org/10.5194/hess-15-425-2011>
86. López O., Houborg R., McCabe M.F. Evaluating the hydrological consistency of evaporation products using satellite-based gravity and rainfall data // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. V. 21. № 1. P. 323–343. [www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/323/2017/](https://doi.org/10.5194/hess-21-323-2017) <https://doi.org/10.5194/hess-21-323-2017>

87. Loveland T.R., Reed B.C., Brown J.F., Ohlen D.O., Zhu Z., Yang L., Merchant J.W. Development of a global landcover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data // *Int. J. Remote Sens.* 2000. V. 21. P. 1303–1330.
88. Mallick K., Toivonen E., Trebs I., Boegh E., Cleverly J., Eamus D., Koivusalo H., Drewry D., Arndt S.K., Griebel A., Beringer J., Garcia M. Bridging Thermal Infrared Sensing and Physically-Based Evapotranspiration Modeling: From Theoretical Implementation to Validation Across an Aridity Gradient in Australian Ecosystems // *Water Resour. Res.* 2018. V. 54. № 5. P. 3409–3435.
<https://doi.org/10.1029/2017WR021357>
89. Martens B., de Jeu R.A.M., Verhoest N.E.C., Schuurmans H., Kleijer J., Miralles D.G. Towards Estimating Land Evaporation at Field Scales Using GLEAM // *Remote Sens.* 2018. V. 10. № 11. P. 1720.
<https://doi.org/10.3390/rs10111720>
90. Martens B., Miralles D.G., Lievens H., van der Schalie R., de Jeu R.A.M., Fernández-Prieto D., Beck H.E., Dorigo W.A., Verhoest N.E.C. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture // *Geosci. Model Dev.* 2017. V. 10. P. 1903–1925.
www.geosci-model-dev.net/10/1903/2017/
<https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017>
91. Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meryguet C., Lacaze R. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models // *J. Clim.* 2003. V. 16. № 9. P. 1261–1282.
<https://doi.org/10.1175/1520-0442-16.9.1261>
92. McCabe M.F., Rodell M., Alsdorf D.E., Miralles D.G., Uijlenhoet R., Wagner W., Lucieer A., Houborg R., Verhoest N.E.C., Franz T.E., Shi J., Gao H., Wood E.F. The future of Earth observation in hydrology // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. V. 21. P. 3879–3914.
93. Ménard C.B., Ikonen J., Rautiainen K., Aurela M., Arslan A.N., Pulliainen J. Effects of Meteorological and Ancillary Data, Temporal Averaging, and Evaluation Methods on Model Performance and Uncertainty in a Land Surface Model // *J. Hydrometeorol.* 2015. V. 16. P. 2559–2576.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0013.1>
94. Miralles D.G., Holmes T.R.H., de Jeu R.A.M., Gash J.H., Meesters A.G.C.A., Dolman A.J. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 453–469.
<https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>
95. Miralles D.G., de Jeu R.A.M., Gash J.H., Holmes T.R.H., Dolman A.J. Magnitude and variability of land evaporation and its components at the global scale // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 967–981.
<https://doi.org/10.5194/hess-15-967-2011>
96. Mitchell K.E., Lohmann D., Houser P.R., Wood E.F., Schaake J.C., Robock A., Cosgrove B.A., Sheffield J., Duan Q., Luo L., Higgins R.W., Pinker R.T., Tarpley J.D., Lettenmaier D.P., Marshall C.H., Entin J.K., Pan M., Shi W., Koren V., Meng J., Ramsay B.H., Bailey A.A. The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system // *J. Geophys. Res. Atm.* 2004. V. 109. Iss. D7. D07S9016.
<https://doi.org/10.1029/2003JD003823>
97. MODIS ALBEDO
<http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/ALBEDO/index.html>
98. MODIS NDVI
<http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/ECOSYSTEM/>
99. Mu Q., Zhao M., Running S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // *Remote Sens. Environ.* 2011. V. 115. P. 1781–1800.
100. Muzalevskiy K., Zeyliger A. Application of Sentinel-1B Polarimetric Observations to Soil Moisture Retrieval Using Neural Networks: Case Study for Bare Siberian Chernozem Soil // *Remote Sens.* 2021. V. 13. 3480.
<https://doi.org/10.3390/rs13173480>
101. Muzylev E., Startseva Z., Volkova E., Vasilenko E. Utilizing satellite data of several spectral ranges for modeling the processes of water and heat regime formation of vast territories // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2020. V. 17. № 6. P. 129–136.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-129-136>
102. NCEI products <https://www.ncei.noaa.gov/products>
103. Ndou N.N., Palamuleni L.G., Ramoelo A. Modelling depth to groundwater level using SEBAL-based dry season potential evapotranspiration in the upper Molopo River Catchment, South Africa // *Egypt. J. Rem. Sens. Space Sci.* 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.08.003>
104. Nicolai-Shaw N., Zscheischler J., Hirschi M., Gudmundsson L., Seneviratne S.I. A drought event composite analysis using satellite remote-sensing based soil moisture // *Remote Sens. Environ.* 2017. V. 203. P. 216–225.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.014>
105. Niu G.Y., Yang Z.L., Mitchell K.E., Chen F., Ek M.B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP) 1. Model description and evaluation with local scale measurements // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. D12109.
<https://doi.org/10.1029/2010JD015139>
106. Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1992. V. 30. № 2. P. 370–381.
107. Oki T., Imaoka K., Kachi M. AMSR Instruments on GCOM-W1/2: Concepts and Applications // *IEEE IGARSS-10. Honolulu, Hawaii, New York, USA: IEEE Publ.*, 2010. http://vigir.missouri.edu/~gdesouza/Research/Conference_CDs/IGARSS_2010/pdfs/2907.pdf
108. O'Neill K.P., Harden J.W., Trumbore S.E., Bentley M.O., Winston G., Stephens B.B., Black T.A. Boreal Ecosystem-Atmosphere Study (BOREAS) 1993 Field Notes, Thompson, Manitoba // *Open-File Report 95-488. U.S. Geol. Survey. U.S. Department of the Interior.* 66 p.
<https://doi.org/10.3133/ofr95488>
109. OSCAR. <https://www.wmo-sat.info/oscar/>

110. Ottlé C., Vidal-Madjar D. Assimilation of Soil-Moisture Inferred from Infrared Remote Sensing in a Hydrological Model over the HAPEX-MOBILHY Region // *J. Hydrol.* 1994. V. 158. P. 241–264. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90056-6)
111. Overgaard J., Rosbjerg D., Butts M.B. Land-surface modeling in hydrological perspective – a review // *Biogeosci.* 2006. V. 3. P. 229–41.
112. Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements // *Land Use Policy.* 2012. V. 29. № 2. P. 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003>
113. Peng J., Albergel C., Balenzano A., Brocca L., Cartus O., Cosh M.H., Crow W.T., Dabrowska-Zielinska K., Davidson S., Davidson M.W.J., de Rosnay P., Dorigo W., Gruber A., Hagemann S., Hirschi M., Kerr Y.H., Lovergine F., Mahecha M.D., Marzahn P., Mattia F., Musial J.P., Preusmann S., Reichle R.H., Satalino G., Silgram M., van Bodegom P.M., Verhoest N.E.C., Wagner W., Walker J.P., Wegmüller U., Loew A. A roadmap for high-resolution satellite soil moisture applications – confronting product characteristics with user requirements // *Remote Sens. Environ.* 2021. V. 252. 112162. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112162>
114. Picoli M.C.A., Simoes R., Chaves M., Santos L.A., Sanchez A., Soares A., Sanches I.D., Ferreira K.R., Queiroz G.R. CBERS Data Cube: A Powerful Technology for Mapping and Monitoring Brazilian Biomes // *ISPRS Annals Photogrammetry, Remote Sens. Spatial Inform. Sci.* V. V-3-2020. XXIV ISPRS Congress (2020 edition). P. 533–539. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-533-2020>
115. Pitman A.J. The Evolution of, and Revolution In, Land Surface Schemes Designed for Climate Models // *Int. J. Clim.* 2003. V. 23. P. 479–510.
116. Rains D., Lievens H., De Lannoy G.J.M., McCabe M., de Jeu R.A.M., Miralles D.G. Sentinel-1 Backscatter Assimilation Using Support Vector Regression or the Water Cloud Model at European Soil Moisture Sites // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2022. V. 19. 4013105. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3073484>
117. Rautiainen K., Parkkinen T., Lemmetyinen J., Schwank M., Wiesmann A., Ikonen J., Derksen C., Davydov S., Davydova A., Boike J., Langer M., Drusch M., Pulliainen J. SMOS prototype algorithm for detecting autumn soil freezing // *Remote Sens. Environ.* 2016. V. 180. 346360. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.012>
118. Reichle R., Koster R., De Lannoy G., Crow W., Kimball J. SMAP Level 4 Surface and Root Zone Soil Moisture (L4_SM) Data Product. Algorithm Theoretical Basis Document // Revision A. December 9. 2014. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center, 2014. 66 p. https://smap.jpl.nasa.gov>272_L4_SM_RevA_web
119. Rodell M., Famiglietti J.S., Wiese D.N., Reager J.T., Beaudoin H.K., Landerer F.W., Lo M.-H. Emerging trends in global freshwater Emerging trends in global freshwater availability // *Nature.* 2018. May 31. V. 557. P. 651–659.
120. Rodell M., Houser P.R., Jambor U., Gottschalk J., Mitchell K., Meng C.-J., Arsenault K., Cosgrove B., Radakovich J., Bosilovich M., Entin J.K., Walker J.P., Lohmann D., Toll D. The Global Land Data Assimilation System // *Bull. Am. Met. Soc.* 2004. № 3. P. 381–394.
121. Rodríguez-Fernández N.J., Kerr Y.H., van der Schalie R., Al-Yaari A., Wigneron J.-P., de Jeu R., Richaume P., Dutra E., Mialon A., Drusch M. Long Term Global Surface Soil Moisture Fields Using an SMOS-Trained Neural Network Applied to AMSR-E Data // *Remote Sens.* 2016. V. 8. № 11. P. 959. <https://doi.org/10.3390/rs8110959>
122. Sabaghy S., Walker J.P., Renzullo L.J., Akbarn R., Chan S., Chaubell J., Das N., Dunbar R.S., Entekhabi D., Gevaert A., Jackson T.J., Loew A., Merlin O., Moghaddam M., Peng J.A., Peng J.Z., Piepmeyer J., Rüdiger C., Stefan V., Wu X., Ye N., Yueh S. Comprehensive analysis of alternative downscaled soil moisture products // *Remote Sens. Environ.* 2020. V. 239. 111586. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111586>
123. Schaake J., Cong S., Duan Q. The US MOPEX Data Set // *Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment – MOPEX.* IAHS Publ. No 307. 2006. P. 9–28.
124. Schmugge T.J., Andre J.-C., Goutorbe J.-P. HAPEX-MOBILHY: results from the special observing period // *Remote Sensing of the Biosphere. Proc. 1990 Tech. Symp. Optics, Electro-Optics, and Sensors (SPIE).* Orlando, FL, USA, 1990. V. 1300. <https://doi.org/10.1117/12.21397>
125. Schneider R., Godiksen P.N., Villadsen H., Madsen H., Bauer-Gottwein P. Application of CryoSat-2 altimetry data for river analysis and modeling // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. V. 21. № 2. P. 751–764.
126. Seguin B., Assad E., Freteaud J.-P., Imbernon J., Kerr Y.H., Lagouarde J.-P. Use of Meteorological Satellites for Water Balance Monitoring in Sahelian Regions // *Int. J. Remote Sens.* 1989. V. 10. P. 1101–1117. <https://doi.org/10.1080/01431168908903948>
127. Seguin B., Lagouarde J.-P., Savane M. The Assessment of Regional Crop Water Conditions from Meteorological Satellite Thermal Infrared Data // *Remote Sens. Environ.* 1991. V. 35. P. 141–148. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90007-S](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90007-S)
128. Sellers P.J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration // *Int. J. Remote Sens.* 1985. V. 6. № 8. P. 1335–1372. <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>
129. Sellers P.J., Hall F.G., Asrar G., Strebel D.E., Murphy R.E. The first ISLSCP field experiment (FIFE) // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1988. V. 69. № 1. P. 22–27.
130. Sellers P.J., Hall F.G., Asrar G., Strebel D.E., Murphy R.E. An Overview of the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE) // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № D17. P. 18345–18371.
131. Sellers P., Hall F., Margolis H., Kelly B., Baldocchi D., den Hartog G., Cihlar J., Ryan M.G., Goodison B., Crill P., Ranson K.J., Lettenmaier D., Wickland D.E. The Boreal Ecosystem–Atmosphere Study (BOREAS):

- An Overview and Early Results from the 1994 Field Year // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1995. V. 76. № 9. P. 1549–1577.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<1549:TBESAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<1549:TBESAO>2.0.CO;2)
132. *Sellers P.J., Mintz Y., Sud Y.C., Dalcher A.* A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models // *J. Atmos. Sci.* 1986. V. 43. № 6. P. 505–531.
 133. *Sellers P.J., Rasool S.I., Bolle H.J.* A review of satellite data algorithms for studies of the land surface // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1990. V. 71. № 10. P. 1429–1447.
 134. *Serafini Y.V.* Estimation of the Evapotranspiration Using Surface and Satellite Data // *Int. J. Remote Sens.* 1987. V. 8. P. 1547–1562. Doi: <https://doi.org/10.1080/01431168708954796>
 135. *Shi J., Dong X., Zhao T., Du J., Jiang L., Du Y., Liu H., Wang Z., Ji D., Xiong C.* WCOM: The science scenario and objectives of a global water cycle observation mission // *Proc. IGARSS-2014*. Quebec City, Canada; New York, USA: IEEE Publ., 2014. P. 3646–3649.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947273>
 136. *Shi J., Dong X., Zhao T., Du Y., Liu H., Wang Z., Zhu D., Ji D., Xiong C., Jiang L.* The Water Cycle Observation Mission (WCOM): Overview // *Proc. IGARSS-2016*. Beijing, China. New York, USA: IEEE Publ., 2016. P. 3430–3433.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729886>
 137. *Shi J., Zhao T., Cui Q., Yao P.* Airborne and Spaceborne Passive Microwave Measurements of Soil Moisture // *Observation and Measurement of Ecohydrological Processes, Ecohydrology* / Eds X. Li, H. Vereecken. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2019. Chapter. P. 71–105.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-48297-1_3
 138. *Shimoda H., Murakami H., Oki T., Honda Y., Igarashi T.* Overview of GCOM // *Proc. IGARSS-2011*. Vancouver, Canada. New York, USA: IEEE Publ., 2011. P. 4134–4137. <http://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2011/07/OverviewofGCOM.pdf>
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6050143>
 139. *Spennemann P.C., Fernández-Long M.E., Gattinoni N.N., Cammalleri C., Naumann G.* Soil moisture evaluation over the Argentine Pampas using models, satellite estimations and in-situ measurements // *J. Hydrol. Regional Studies*. 2020. V. 31. 100723. P. 1–18.
 140. *Startseva Z., Muzylev E., Volkova E., Uspensky A., Uspensky S.* Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data // *Int. J. Rem. Sens.* 2014. V. 35. № 15. P. 5775–5799.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2014.945003>
 141. *Stephens G., Polcher J., Zeng X., van Oevelen P., Poveda G., Bosilovich M., Ahn M.-H., Balsamo G., Duan Q., Hegerl G., Jakob C., Lamptey B., Leung R., Piles M., Su Z., Dirmeyer P., Findell K.L., Verhoef A., Ek M., L'Ecuyer T., Roca R., Nazemi A., Dominguez F., Klocke D., Bony S.* The First 30 years of GEWEX // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* Nov. 2022. 66 p.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0061.1>
 142. *Taconet O., Bernard L., Vidal-Madjar D.* Evapotranspiration over agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data // *J. Clim. Appl. Meteorol.* 1986. V. 25. № 3. P. 284–307.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025<0284:EOAARU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0284:EOAARU>2.0.CO;2)
 143. *Tapley B.D., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C.* The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L09607. <ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/L2/CSR/RL05/>
<https://doi.org/10.1029/2004GL019920>
 144. *Tofigh S., Rahimi D., Zakerinejad R.* A comparison of actual evapotranspiration estimates based on Remote Sensing approaches with a classical climate data driven method // *AUC Geographica*. 2020. V. 55. № 2. P. 165–182.
<https://doi.org/10.14712/23361980.2020.12>
 145. *Wagner W., Hahn S., Kidd R., Melzer T., Bartalis Z., Hasenauer S., Figa-Saldan J., de Rosnay P., Jann A., Schneider S., Komma J., Kubu G., Brugger K., Aubrecht C., Zuger J., Gangkofner U., Kienberger S., Brocca L., Wang Y., Blöschl G., Eitzinger J., Steinnocher K., Zeil P., Rubel F.* The ASCAT Soil Moisture Product: A Review of its Specifications, Validation Results, and Emerging Applications // *Meteorol. Z.* 2013. V. 22. № 1. P. 5–33.
 146. *Wang W., Huang D., Wang X.-G., Liu Y.-R., Zhou F.* Estimation of soil moisture using trapezoidal relationship between remotely sensed land surface temperature and vegetation index // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 1699–1712. www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/1699/2011/
<https://doi.org/10.5194/hess-15-1699-2011>
 147. *Wang Y., Zhang S., Chang X.* Evapotranspiration Estimation Based on Remote Sensing and the SEBAL Model in the Bosten Lake Basin of China // *Sustainability*. 2020. V. 12. P. 7293.
<https://doi.org/10.3390/su12187293>
 148. *Wie W., Pang S., Wang X., Zhou L., Xie B., Zhou J., Li C.* Temperature Vegetation Precipitation Dryness Index (TVPDI)-based dryness-wetness monitoring in China // *Rem. Sens. Environ.* 2020. V. 248. 111957.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111957>
 149. WIGOS <https://public.wmo.int/en/about-us/vision-and-mission/wmo-integrated-global-observing-system>
 150. WIGOS Highway https://ane4bf-datap1.s3.eu-west-1.amazonaws.com/wmod8_gcoss3fs-public/2018_10_31_wigos-highway_uganda_0.pdf?ydrJDTL-weQBhmZljgcUwuXLPT
 151. *Wu K., Ryu D., Nie L., Shu H.* Time-variant error characterization of SMAP and ASCAT soil moisture using Triple Collocation Analysis // *Rem. Sens. Environ.* 2021. V. 256. 112324.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112324>
 152. *Wulfmeyer V., Turner D.D., Baker B., Banta R., Behrendt A., Bonin T., Brewer W.A., Buban M., Choukulkar A., Dumas E., Hardesty R.M., Heus T., Ingwersen J., Lange D., Lee T.R., Metzendorf S., Muppa S.K., Meyers T., Newsom R., Osman M., Raasch S., Santanello J., Senff C., Späth F., Wagner T., Weckwerth T.* A New Research Approach for Observing and Characterizing Land-Atmosphere Feedback // *Bull. Am. Met. Soc.* 2018. № 8. P. 1639–1668.
 153. *Xia T., Kustas W.P., Anderson M.C., Alfieri J.G., Gao F., McKee L., Prueger J.H., Geli H.M.E., Neale C.M.U.,*

- Sanchez L., Alsina M.M., Wang Z. Mapping evapotranspiration with high-resolution aircraft imagery over vineyards using one- and two-source modeling schemes // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016. V. 20. P. 1523–1545.
https://doi.org/10.5194/hess-20-1523-2016
154. Xia Y.L., Hao Z.C., Shi C.X., Li Y.H., Meng J., Xu T.R., Wu X.Y., Zhang B.Q. Regional and global land data assimilation systems: Innovations, challenges, and prospects // *J. Meteorol. Res.* 2019. V. 33. № 2. P. 1–31.
https://doi.org/10.1007/s13351-019-8172-4
 155. Xia Y., Mitchell K., Ek M., Sheffield J., Cosgrove B., Wood E., Luo L., Alonge C., Wei H., Meng J., Livneh B., Lettenmaier D., Koren V., Duan Q., Mo K., Fan Y., Mocko D. Continental-scale water and energy flux analysis and validation for the North American Land Data Assimilation System project phase 2 (NLDAS-2). 1. Intercomparison and application of model products // *J. Geophys. Res. Atm.* 2012. V. 3. D03109.
https://doi.org/10.1029/2011JD016048
 156. Yao P.P., Shi J.C., Zhao T.J., Lu H.L., Al-Yaari A. Rebuilding Long Time Series Global Soil Moisture Products Using the Neural Network Adopting the Microwave Vegetation Index // *Remote Sens.* 2017. V. 9. № 1. P. 35–61.
https://doi.org/10.3390/rs9010035
 157. Ye N., Walker J.P., Wu X., de Jeu R., Gao Y., Jackson T.J., Jonard F., Kim E., Merlin O., Pauwels V.R.N., Renzullo L.J., Rüdiger C., Sabaghy S., von Hebel C., Yueh S.H., Zhu L. The Soil Moisture Active Passive Experiments: Validation of the SMAP Products in Australia // *IEEE Transactions GeoSci. Remote Sens.* 2021. V. 59. № 4. P. 2922–2939.
https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3007371
 158. Zeng J., Li Z., Chen Q., Bi H., Qiu J., Zou P. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations // *Remote Sens. Environ.* 2015. V. 163. P. 91–110.
https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.008.
https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.008
 159. Zhang K., Chao L.-J., Wang Q.-Q., Huang Y.-C., Liu R.-H., Hong Y., Tu Y., Qu W., Ye J.-Y. Using multi-satellite microwave remote sensing observations for retrieval of daily surface soil moisture across China // *Water Sci. Engine.* 2019. V. 12. № 2. P. 85–97.
https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.06.001
 160. Zhang K., Kimball J.S., Running S.W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation // *WIREs Water.* 2016. V. 3. № 6. P. 834–853.
https://doi.org/10.1002/wat2.1168
 161. Zhang Q., Fan K., Singh V.P., Sun P., Shi P. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture against in situ observations on the Himalayan-Tibetan Plateau // *J. Geophys. Res. Atm.* 2018. V. 123. P. 7132–7148.
https://doi.org/10.1029/2017JD027763
 162. Zhang Y., He B., Guo L., Liu J., Xie X. The relative contributions of precipitation, evapotranspiration, and runoff to terrestrial water storage changes across 168 river basins // *J. Hydrol.* 2019. V. 579. P. 124194.
https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124194
 163. Zhang Y., Leuning R., Chiew F.H.S., Wang E., Zhang L., Liu C., Sun F., Peel M.C., Shen Y., Jung M. Decadal trends in evaporation from global energy and water balances // *J. Hydrometeorol.* 2012. V. 13. P. 379–391.
https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-012.1
 164. Zhao T., Hu L., Shi J., Lü H., Li S., Fan D., Wang P., Geng D., Kang C.S., Zhang Z. Soil moisture retrievals using L-band radiometry from variable angular ground-based and airborne observations // *Remote Sens. Environ.* 2020. V. 248. P. 111958.
 165. Zhao T., Shi J., Entekhabi D., Jackson T.J., Hu L., Peng Z., Yao P., Li S., Kang C.S. Retrievals of soil moisture and vegetation optical depth using a multi-channel collaborative algorithm // *Remote Sens. Environ.* 2021. V. 257. P. 112321.
https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112321
 166. Zhao T., Shi J., Lv L., Xu H., Chen D., Cui Q., Jackson T.J., Yan G., Jia L., Chen L., Zhao K., Zheng X., Zhao L., Zheng C., Ji D., Xiong C., Wang T., Li R., Pan J., Wen J., Yu C., Zheng Y., Jiang L., Chai L., Lu H., Yao P., Ma J., Lv H., Wu J., Zhao W., Yang N., Guo P., Li Y., Hu L., Geng D., Zhang Z. Soil moisture experiment in the Luan River supporting new satellite mission opportunities // *Remote Sens. Environ.* 2020. V. 240. P. 111680.
https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111680
 167. Zhu B., Song X., Leng P., Sun C., Wang R., Jiang X. A Novel Simplified Algorithm for Bare Surface Soil Moisture Retrieval Using L-Band Radiometer // *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2016. V. 5. № 8. P. 143.
https://doi.org/10.3390/ijgi5080143

ПРИЛОЖЕНИЕ

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ АББРЕВИАТУРЫ

ВМО – Всемирная Метеорологическая Организация

КУРЭК (KUREX) – Курский эксперимент (1988 и 1991 гг.)

МСУ-МР – Многоканальное сканирующее устройство малого разрешения

ALOS – Advanced Land Observing Satellite

AMSR – Advanced Microwave Scanning Radiometer

AMSU-B – Advanced Microwave Sounding Unit-B

ASAR – Advanced Synthetic Aperture Radar

ASCAT – Advanced Scatterometer

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer

AW3D30 – ALOS Global Digital Surface Model с 30-метровым разрешением

БАНС – Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (core project of IGBP)

BARC – Beltsville Agricultural Research Center (Центр сельскохозяйственных исследований Белтсвилля, Мэриленд, США)

- BHOA – Balance Hidrolygico Operativo para el Agro
- BOREAS – Boreal Ecosystem-Atmosphere Study
- BPNN – Back Propagation Neural Network
- CCI – Climate Change Initiative
- CHELSEA – Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas
- CRU – Climate Research Union
- CSIRO – Commonwealth Scientific and. Industrial Research Organization
- DAAC – Distributed Active Archive Center for Biogeochemical Dynamics
- ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- ECV – Essential Climate Variables
- ERA-Interim TESSEL – ERA-Interim Tiled ECMWF's Scheme for Surface Exchanges over Land
- EROS – Earth Resources Observation and Science center in Sioux Falls, South Dakota, USA
- ERS – European Remote Sensing satellite
- ESA – European Space Agency
- ESA CCI – European Space Agency Climate Change Initiative
- ESDAC – European Soil Data Centre
- EUMETSAT – European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations
- FAPAR – Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation
- FIFE project – First ISLSCP Field Experiment (1987 и 1989 гг.)
- GCOM-W1 и GCOM-C1 – Global Change Observation Mission – Water и Climate
- GCOS – Global Climate Observing System
- GEOS-5 DAS – Goddard Earth Observing System-5 Data Assimilation System
- GEWEX – Global Energy and Water Cycle EXchanges проект
- GLASS – Global LAnd Surface Satellite
- GLCC – Global Land Cover Characterization
- GLDAS – Global Land Data Assimilation System
- GLEAM – Global Land Evaporation: the Amsterdam Methodology
- GMS – Geostationary Meteorological Satellite
- GNSS – Global Navigation Satellite System
- GOES – Geostationary Operational Environmental Satellite
- GPCC – Global Precipitation Climatology Centre
- GPCP – Global Precipitation Climatology Project
- GRACE-FO – Gravity Recovery and Climate Experiment-Follow-On
- GRDC – Global Runoff Data Centre
- GSWP – Global Soil Wetness Project
- Hyperion – Space-Based Imaging Spectrometer
- H-SAF – Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management
- HWSD – Harmonized World Soil Database
- ICESat-2 – Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2
- IGBP – International Geosphere-Biosphere Programme
- IRI/LDEO CDL – International Research Institute/Lamont-Doherty Earth Observatory Climate Data Library
- ISBA model – Interactions between Soil–Biosphere–Atmosphere land surface model
- ISD – Integrated Surface Database
- ISLSCP II – International Satellite Land Surface Climatology Project, Initiative II – часть проекта GEWEX
- ISMN – International Soil Moisture Network
- JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency
- LAFE – Land Atmosphere Feedback Experiment
- LAI – Leaf Area Index
- LAS – Large Aperture Scintillometer
- LDAS – Land Data Assimilation System
- LE – Latent Heat Flux
- LISFLOOD – rainfall-runoff model
- LPRM – Land Parameter Retrieval Model
- LSA SAF – Land Surface Analysis Satellite Applications Facility
- LSM – Land Surface Model
- LST – Land Surface Temperature
- LUCAS – Land Use/Cover Area frame statistical Survey
- MERRA – Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
- Meteosat – Meteorological Satellite (геостационарный ИСЗ Meteosat Second Generation, MSG)
- MetOp – Meteorological Operational satellite
- METRIC – Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration
- MIRAS – Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis
- MODIS – MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
- MVI – Microwave Vegetation Index
- NASA – National Aeronautics and Space Administration
- NCEI – National Centres for Environmental Information
- NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
- NLDAS – North American Land Data Assimilation System
- NN – Neural Network

- NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
- NGDC – National Geophysical Data Center
- NPP – Net Primary Productivity
- NRCS – Natural Resources Conservation Services
- OLI – Operational Land Imager
- ORNL – Oak Ridge National Laboratory in Oak Ridge, Tennessee, USA
- OSCAR – Observing Systems Capability Analysis and Review
- PAR – Photosynthetically Active Radiation
- PLIS – Polarimetric L-band Imaging Scatterometer
- PLMR – Polarimetric L-band Multibeam Radiometer
- PML – Penman-Monteith-Leuning
- PRISM – Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping
- PROBA – PROject for On-Board Autonomy
- RMSE – Root Mean Square Error
- SCAN – Soil Climate Analysis Network
- SEB – Surface Energy Balance
- SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land
- SEBS – Surface Energy Balance System
- SEVIRI – Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager
- SM – Soil Moisture
- SMAP – Soil Moisture Active Passive
- SMMR – Scanning Multichannel Microwave Radiometer
- SMOS – Soil Moisture and Oceans Salinity
- SNPP – Suomi National Polar-orbiting Partnership
- SPI – Standardized Precipitation Index
- SPOT – Satellite Pour l’Observation de la Terre
- SRTM – Shuttle Radar Topography Mission
- SSM/I – Special Sensor Microwave/Imager
- SVAT – Soil Vegetation Atmosphere Transfer
- SWE – Snow Water Equivalent
- SWI – Soil Water Index
- SWIR – shortwave infrared
- SWOT – Surface Water and Ocean Topography
- TIRS – Thermal Infrared Sensor
- TRMM – Tropical Rainfall Measuring Mission
- TRMM-TMI – TRMM Microwave Imager
- TSEB – Two-Source Energy Balance
- TVPDI – Temperature Vegetation Precipitation Dryness Index
- TWRS – Terrestrial Water Resources Satellite
- USDA – United States Department of Agriculture
- USGS – United States Geological Survey
- USGS LCI – USGS Land Cover Institute – база данных о наземном покрове Геологической службы США
- VCF product – Vegetation Continuous Fields product
- VI – Vegetation Index
- VIIRS – Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
- VNIR – visible and near-infrared
- WCOM – Water Cycle Observation Mission
- WCRP – World Climate Research Programme
- WDI – Water Deficit Index
- WHYCOS – World Hydrological Cycle Observing System
- WIGOS – WMO Integrated Global Observing System
- Windsat – Coriolis satellite with WindSat space-borne polarimetric microwave radiometer on board