

9.2. Геофизическая влагометрия для целей цифрового орошаемого земледелия (Гавриловская Н.В., Гаспарян И.Н., Дубенок Н.Н., Ермолаева О.С., Зейлигер А.М., Ивашова О.Н., Михеев П.А., Палиивец М.С., Петухова М.В., Подобный А.В., Снежко В.Л., Солошенко А.Д., Шабанов В.В., Щедрина Е.В.)

Информация о влагозапасах почвенного покрова играет важную роль для решения многих теоретических и прикладных задач. В частности, они необходимы, как для углубления понимания протекающих при этом процессов массопереноса в пористом пространстве почвенно-грунтовой толщи, так и связанных с процессом теплообмена, а также роста и развития растений в комплексе, который связывает почвенно-грунтовую толщу с растительным покровом и приземным слоем атмосферы. Прикладные аспекты решения использования данных о влагозапасах связаны с оптимизацией применяемых, как уже на практике технологий ведения земледелия, так и разработке новых, в частности базирующихся на концепции цифрового земледелия [187].

В настоящее время методы электромагнитной влагометрии (ЭМВ) составляют основу наиболее распространенных и эффективных технологий косвенного измерения влажности (влагозапасов) разнообразных по своей природе пористых материалов, включая почвы. В последнем случае методы ЭМВ относят к категории геофизических методов исследования пористых сред природного или природно-антропогенного происхождения. Другие известные методы косвенной оценки влагозапасов почвенных сред основаны на иных физических принципах (нейтронная влагометрия, тензометрия, кондуктометрия и пр.) и используются в основном, при проведении научных исследований.

Как известно, физическую основу ЭМВ составляет значимое различие диэлектрических свойств порового раствора и органоминеральной основы каркаса пористой среды. К достоинствам методов ЭМВ относятся: а) быстрота и практическая непрерывность измерений; б) адаптация к условиям долгосрочного мониторинга; в) автоматизация измерений и передачи данных.

Эти достоинства позволяют создавать новые устройства и сети мониторинга или адаптировать существующее приборное и сетевое оснащение под специфические требования исследовательских и производственных проектов.

В значительном большинстве для профилирования влагозапасов используются т.н. инвазивные методы, основанные на измерениях с помощью датчиков, помещенных в почвенную среду, или емкостных характеристик, или скорости отраженного электромагнитного импульса (Time Domain Reflectometry - TDR) [194, 230]. Результатами таких измерений являются значения влагозапасов в относительно небольших объемах опробования, размеры которых лежат в диапазоне от нескольких сантиметров до нескольких дециметров по всем трем пространственным направлениям. Перемещение такого рода датчиков по почвенному профилю или создание в почвенном профиле сети таких датчиков, расположенных по вертикали (далее - профилометр влагозапасов), позволяет получать значения влагозапасов его отдельных слоев с достаточно высокой детальностью. При правильной эксплуатации стационарно расположенные инвазивные профилометры позволяют получать надежные послойные данные влагозапасов с высокой периодичностью, в течение достаточно длительного времени практически в любых погодных условиях. Среди недостатков применения профилометров влагозапасов для целей площадного мониторинга необходимо отметить: а) зависимость площадной разрешающей способности от плотности установки профилометров; б) неопределенности, возникающие при пространственной экстраполяции/интерполяции результатов таких измерений, в частности, при их относительно разреженной установке.

Наряду с инвазивными геофизическими методами ЭМВ в настоящее время активно развиваются не инвазивные методы измерений, основанные на измерении характеристик электромагнитных полей с низкими амплитудами. Примерами реализации таких методов являются георадарные системы [233], а также системы индукционной рефлектометрии [54]. Георадарные системы активного зондирования (георадары – Ground Penetration Radar - GPR), так же,

как и индукционные рефлектометры (Electro Magnetic Induction - EMI) относятся к категории приборов, использующих не инвазивные методы ЭМВ. Эти приборы позволяют получать влагометрические данные с достаточно высоким пространственным разрешением, в том числе для глубин измерений, сопоставимых с глубиной корнеобитаемого слоя большинства сельскохозяйственных культур. Модификация метода индукционной рефлектометрии позволяет проводить послойное измерение влагозапасов.

В ряде случаев получаемые результаты георадарной съемки чувствительны к характеристикам подстилающего слоя [201]. Для учета этих факторов был разработан набор эмпирических моделей, применение которых требует проведения калибровки на исследуемой территории. Аналогичный недостаток свойственен и индукционным рефлектометрам, показания которых высокочувствительны к химическому составу и концентрации порового раствора. Диапазон характерных размеров объемов, проводимых с помощью георадарных и индукционно-рефлектометрических измерений в стационарном состоянии варьирует от нескольких дециметров до нескольких метров, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях [194]. Отмеченные характеристики результатов измерений георадарными и индукционно-рефлектометрическими методами позволяет отнести их к категории не инвазивного профилирования влагозапасов, основанных на ЭМВ.

Перемещение соответствующих измерительных устройств не инвазивного профилирования влагозапасов на передвижных платформах позволяет варьировать траекториями движения для получения необходимого покрытия объекта мониторинга данными измерениями с требуемым разрешением. В результате могут быть получены массивы данных измерений для территорий с относительно большими размерами, а при необходимости - гибко настраивать маршрут проведения съемки с учетом характеристик почвенного и растительного покрова. Более того, при использовании систем параллельного вождения на движущем самоходной устройстве появляется возможность автоматизации на основе технологии Глобальных Навигационных

Спутниковых Систем (ГНСС), что делает такую съемку независимой от времени суток. К недостаткам не инвазивного профилирования влагозапасов можно отнести: а) относительно высокую стоимость затрат; б) зависимость реализации от погодных условий; в) меньшую в сравнении с инвазивным профилированием влагозапасов разрешающую способность профилирования.

Для увеличения разрешения методов не инвазивного профилирования по почвенному профилю проводятся исследования по их совместному использованию с другими методами, такими как пассивная микроволновая радиометрия, а также не инвазивная электромагнитная индуктометрия [212] и инвазивная профилометрия. Другим примером не инвазивных геофизических методов ЭМВ являются радарные системы с синтезированной апертурой (SAR) [224]. В этом случае диапазон характерных размеров зон опробований в горизонтальном направлении в стационарном состоянии варьирует в диапазоне от нескольких метров до нескольких километров. Такой широкий спектр характерных размеров связан с высотой расположения съемочной платформы над земной поверхностью, на которой располагается принимающая антенна. Третий характерный размер радарных измерений с синтезированной апертурой - это глубина от дневной поверхности. Значения этой глубины лежат в пределах нескольких сантиметров и зависят в основном от гранулометрических свойств поверхностного слоя почвенного покрова. Характерные размеры зон опробований радарных методов с синтезированной апертурой позволяют их отнести к подкатегории не инвазивных однослойных методов. Использование соответствующей измерительной аппаратуры на космические платформы позволяет получать с ее помощью в любых погодных условиях практически бесшовные покрытия влагозапасов верхнего слоя почвенного покрова, как с высокой временной повторяемостью и низкой разрешающей способностью, так и со средней повторяемостью и относительно высоким пространственным разрешением.

К той же подкатегории методов не инвазивной геофизической однослойной влагометрии относится метод активного измерения влагозапасов

поверхностного слоя почвенного покрова, основанном на сигналах глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС-влажнометрии), таких как GPS и ГЛОНАСС. В основе этого ГНСС-влажнометрии лежит связь между амплитудой и фазой нисходящего и отраженного сигнала ГНСС-систем от влажности верхнего слоя почвы. В основном методу ГНСС-влажнометрии присущи те же достоинства и недостатки, что и георадарным и индукционно-рефлектометрическим методам, приведенным выше. При этом необходимо отметить два дополнительных достоинства ГНСС-влажнометрии. Первое из них состоит в возможности проведения измерений практически непрерывно и повсеместно, куда доходят сигналы от ГНСС-систем. Второе достоинство заключается в возможности размещения соответствующих устройств на БПЛА.

В последние годы в связи с открывшимися возможностями использования данных радиотепловой съемки радиоизлучения, исходящего от подстилающего слоя, начинают развиваться геофизические методы ЭМВ по оценке доступных для сельскохозяйственных посевов влагозапасов в корнеобитаемом слое. В основе этих методов лежит оценка реакции таких посевов на водный стресс, вызываемый уровнем доступности этих влагозапасов в корнеобитаемом слое [209]. С этой целью используются данные аэрокосмической съемки в видимом, ближнем инфракрасном и тепловом инфракрасном каналах съемочной аппаратуры. Для совместной интерпретации такого рода данных привлекаются данные гидрометеорологического мониторинга и характеристик растительного покрова, рассчитываемых по данным аэрокосмической съемки [194]. Интерпретация этих данных с помощью агрогидрологических моделей, связывающих доступные влагозапасы корнеобитаемого слоя почвы с интенсивностью испарения и транспирации посевов сельскохозяйственных культур в течении вегетационного развития, позволяет оценить влагозапасы корнеобитаемого слоя почв, доступные для использования сельскохозяйственными растениями.

Среди достоинств описанного метода радиотепловой влажометрии следует отметить, что в результате его применения получают оценки, не всех

влагозапасов почвенного профиля, а непосредственно влагозапасов доступных для отбора корневой системой сельскохозяйственных посевов. Это позволяет рассматривать этот метод в качестве перспективного для решения практических задач, необходимых для развития цифрового земледелия, в частности, для целей оперативного управления цифровым орошаемым земледелием [239]. К недостаткам описанного метода в сравнении с неинвазивными методами профилометрии влагозапасов меньше пространственное разрешение, получаемое с использованием существующих систем космической радиотепловой съемки, а также зависимость осуществления этой съемки от погодных условий.

Пестрота почвенного покрова оказывает существенное влияние на пространственную вариабельность гидрохимического и теплофизического режимов почв. Формируемая при этом пространственная вариабельность процессов энерго- и массопереноса в почвенно-грунтовых средах, отмечается на разных уровнях пространственного обобщения, начиная с уровня порового пространства, вплоть до уровня водосборов. На уровне сельскохозяйственного поля, где имеет место сочетание природных факторов почвообразования с антропогенными воздействиями, эта вариабельность проявляется в формировании контуров внутри выращиваемых сельскохозяйственных посевов, с различающимися характеристиками роста и развития, и выражающаяся в различии урожайности [49, 129]. Для адаптации технологий земледелия к пространственной неоднородности почвенной толщи в границах отдельного сельскохозяйственного поля разрабатываются и применяются технологии точного (координатного) земледелия. Эти технологии, основанные на результатах научных исследований закономерностей протекания био-физико-химических процессов в подстиляющей слое Земли направлены на создание природоподобных антропогенных систем с целью эффективного использования энергетических, почвенных, минеральных и водных ресурсов.

Отличительной чертой многочисленных процессов, протекающих в почвенном покрове при орошении посевов сельскохозяйственных культур,

является интенсификация процессов влагопереноса в теплый период года и индуцированных этим сопутствующих процессов. Характеристики такой интенсификации в значительной мере связаны с технологиями орошения, а также с региональными и локальными особенностями их применения.

Дождевание сельскохозяйственных культур на значительных по размерам посевах является технологией с высокими показателями эффективности. В ее основе лежит идеализированная концепция равномерной водоподдачи по всей площади орошаемого контура, представляющее пространство орошаемого поля, на котором отсутствует или слабо проявляется закономерности пространственного распределения характеристик, отвечающих за накопление и расходование воды в корнеобитаемом слое почвы. В результате практического применения этой технологии в тех случаях, когда базовая гипотеза не соответствует реальности, возникают условия для дифференциации водных режимов по отдельным квазиоднородным контурам внутри границ орошаемого поля. В итоге это приводит к снижению урожайности и эффективности использования поливной воды при орошении на площади тех контуров, где формируемые в результате орошения влагозапасы корнеобитаемого слоя выходят за установленные границы оптимальности. Это было наглядно продемонстрировано при пространственно-временном анализе данных полевых экспериментов, проведенных с использованием геофизических методов исследований в 2002 - 2012 гг. на оросительных системах Саратовского Заволжья [53].

Полученные результаты пространственно-временного анализа легли в основу концепции неuniformного, пространственно-дифференцированного дождевания (ПДД) квазиоднородных контуров на пространстве орошаемого поля [52] за счет варьирования величинами поливных норм и интенсивности водоподдачи по зонам управления дождевальными насадами, формирующими дождевой фронт. Согласно разработанной технологической схеме ПДД режимом работы каждой из насадок дождевальной машины управляет бортовой микропроцессор. Этот микропроцессор с помощью бортовой антенны ГНСС

контролирует положение разбрызгивателей на пространстве орошаемого поля, а для выполнения заданных технологической картой норм и интенсивностей полива формирует команды драйверам, управляющими работой разбрызгивателей. Такая схема позволяет гибко в оперативном режиме настраивать реализацию поливов в соответствии с идентифицированными контурами. В результате настройки норм и интенсивности водоподдачи минимизируются недостатки технологии равномерного дождевания. В итоге это позволяет создать условия: а) увеличения урожайности посевов сельскохозяйственных культур; б) повышения эффективности использования поливной воды посевами сельскохозяйственных культур; в) снижения эксплуатационных затрат, связанных с орошением; г) уменьшения негативного влияния орошения на экосистемы земельных и водных объектов; д) предотвращения деградации орошаемых земель.

Комплексное применение методов и технологий электромагнитной влагометрии почвенного покрова на уровне орошаемого сельскохозяйственного поля. Технологические карты поливов для реализации пространственно-дифференцированного полива, основаны на пространственных данных влагозапасов корнеобитаемого слоя почв. В настоящее время для получения пространственных данных влагозапасов проводятся исследования по применению геофизических методов электромагнитной влагометрии почв и термографии подстилающего слоя.

Недостатки применения оборудованных стационарных скважин для измерения влагозапасов с целью составления технологических карт поливов проявляются при пространственной интерпретации, получаемых с этих скважин данных. В зависимости от расстояний между разбрызгивателями площади зон обслуживания на одной стоянке дождевальных машин типа Фрегат варьируют в пределах от 50 до 200 м². В связи с этим для получения надежных значений влагозапасов в пределах каждой зоны обслуживания, основанных на профильных измерениях, зачастую, необходимо устройство достаточно плотной сети мониторинга, что требует значительных капитальных

и эксплуатационных затрат. Более того устройство стационарных скважин внутри сельскохозяйственного поля приводит к трудностям его сельскохозяйственной обработки и/или выводу их из эксплуатации в результате повреждений. Применение же переносимых инвазивных измерительных устройств требует в настоящее время значительного времени для реализации на значительных по размерам сельскохозяйственным полях, а также большого объема ручного труда. Применение же роботизированных устройств пока ограничено отсутствием исследований, необходимых для создания конструкций соответствующих измерительных устройств, а соответственно и возможностью оценить их надежность и экономическую целесообразность их применения.

Во втором случае не инвазивного измерения влагозапасов соответствующие измерительные устройства устанавливаются на мобильные наземные или аэрокосмические платформы. При перемещении этих устройств по/над земной поверхностью с помощью этих устройств производится регистрация значений измеряемых характеристик электромагнитного поля и координат точек регистрации. Сформированные таким образом наборы локализованных данных измерений интерпретируются в процессе последующей обработки с помощью предназначенных для этого компьютерных средств, что приводит к получению требуемых картограмм послойных влагозапасов. К достоинству не инвазивных методов ЭМВ в сопоставлении с инвазивными следует отнести возможность их настройки для получения пространственной разрешающей способности в соответствии с требованиями построения технологических карт. Недостатком не инвазивных методов характерна необходимость их локальной калибровки, а также сложности их перемещения на мобильных по территории сельскохозяйственного поля, занятых посевам.

Применение методов термографии подстилающего слоя для целей пространственной влагометрии требует применения большого набора наземных данных (рельефа, почвенного покрова, сроков посева, фаз вегетации и пр.), а

также потоков метеорологических данных и данных тепловой съемки объекта мониторинга. Для практической реализации сбора, обработки и последующей интеграции данных мониторинга в базу геоданных, связанную со специализированным программным обеспечением, необходимо эти процессы автоматизировать [163, 186].

В настоящее время не существует методов, с помощью которых можно формировать наборы данных для практической реализации дождевания посевов сельскохозяйственных культур с использованием современных цифровых технологий. Для создания технологических карт реализации пространственно-дифференцированного дождевания необходимы новые научные знания и практический опыт комплексного использования методов электромагнитной влагометрии, основанных на применении инвазивных и не инвазивных приборов и оборудования, а также методов их пространственного анализа и синтеза. Улучшение пространственных данных влагозапасов масштаба сельскохозяйственного поля за счет комплексного использования методов электромагнитной влагометрии является новой областью знаний, требующей междисциплинарных теоретических исследований, а также проведения полевых исследований с привлечением аэрокосмического мониторинга и компьютерного моделирования.

9.3. Использование инновационных технологических приемов орошения при возделывании двух урожаев (Гавриловская Н.В., Гаспарян И.Н., Дубенок Н.Н., Ермолаева О.С., Зейлигер А.М., Ивашова О.Н., Михеев П.А., Палиивец М.С., Петухова М.В., Подобный А.В., Снежко В.Л., Солошенко А.Д., Шабанов В.В., Щедрина Е.В.)

Картофель – культура, требовательная к влаге. Из-за высокой потребности во влаге урожайность сухого вещества биомассы с гектара выше, чем у других культур и достигает более 10 т/га при урожайности клубней 30