

Точное земледелие: Какой в этом смысл?

В.И. Адамчук

Слово «sense» (чувство, смысл) обычно относится к пяти человеческим чувствам, однако словосочетание «taking sense» (иметь смысл) описывает наши попытки интерпретировать информацию, которая кажется запутанной или противоречивой. В точном земледелии важны оба значения. В то время как оборудование и программное обеспечение развились до практического внедрения дифференцированных технологий возделывания сельскохозяйственных культур, вопрос о том, какой механизм принятия решений должен использоваться, остается открытым. Таким образом, рассматривая карты урожайности и/или аэроснимки, сравнительно легко идентифицировать проблемную область в пределах данного поля, но не всегда очевидно, что должно или, по крайней мере, может быть сделано для решения проблемы. В статье обсуждаются различные сенсорные технологии для оценки почв и растений, которые разработаны в мире для решения данного вопроса, заслуживающего особого внимания.

Концепция точного земледелия основана на идее о том, что неоднородность условий выращивания растений является одной из основных причин внутрипольной пестроты урожайности, и представлении о целесообразности расходования средств химизации в соответствии с локальными изменениями почвенных свойств (Robert, 1993).

Для проведения работ по точному земледелию у сельхозпроизводителя должна быть высококачественная информация о пространственном варьировании различных почвенных показателей, которые могут лимитировать урожайность на конкретных участках поля. Невозможность получения такой информации оперативно и по приемлемой цене, используя отбор почвенных образцов и их лабораторный анализ, остается одним из главных препятствий для внедрения точного земледелия. Для получения слоев с высокой плотностью расположения данных по почвенным показателям используются технологии как наземного, так и дистанционного зондирования. При дистанционном зондировании сенсорные системы устанавливаются на воздухоплавательных платформах или космических спутниках. Наземное зондирование требует размещения сенсора вблизи или даже в контакте с обследуемой почвой. Это позволяет про-

Примечание: Упоминание какой-либо компании или продукта не означает, что они продвигаются или рекомендуются автором или издателем.

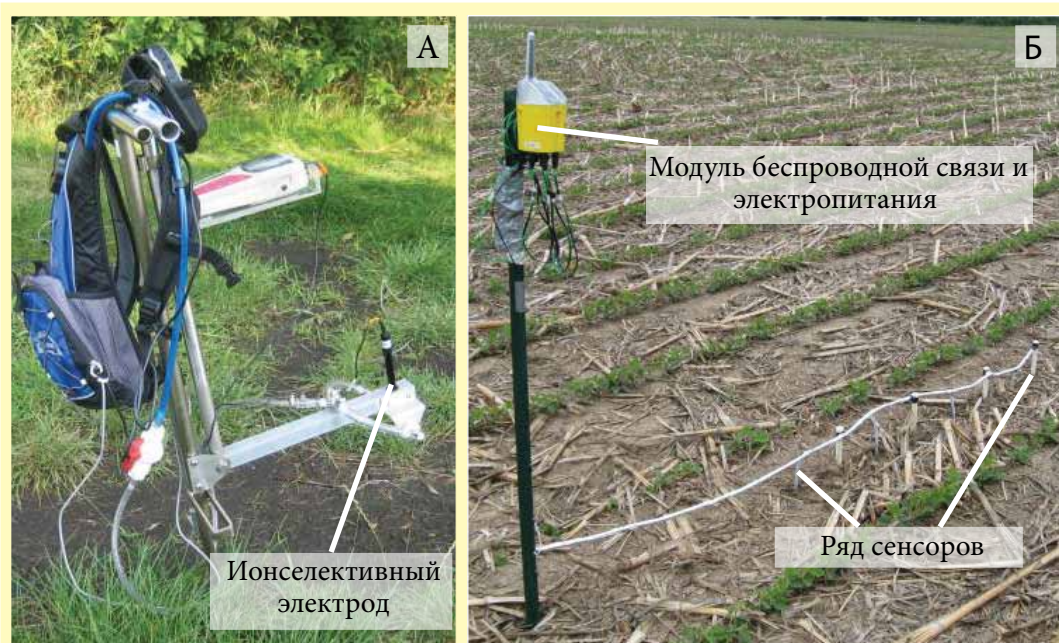


Рис. 1. Оборудование для: а) точечных измерений pH почвы с использованием ручного зонда (Университет Небраски-Линкольна, г. Линкольн, штат Небраска, США), б) точечного мониторинга матричного потенциала почвенной влаги и температуры почвы («Кроссбоу Технолоджи, Инк.», г. Сан-Хосе, штат Калифорния, США).

водить измерения почвенных характеристик *in situ* для конкретных участков на поверхности почвы или глубже (McBratney et al., 2005). Аналогичным образом зондирование сельскохозяйственных культур на уровне растительного покрова или отдельных листьев обеспечивает получение данных о состоянии конкретных растений, которые часто могут быть связаны с условиями произрастания в данном месте.

Некоторые наземные сенсорные системы могут работать в поле в стационарном положении и использоваться для: 1) проведения измерений в одной точке, 2) выполнения серии измерений на разных глубинах в заданной точке или 3) мониторинга изменений почвенных свойств за период времени при установке сенсоров в определенной точке. Например, на **рис. 1а** показан ручной зонд, разработанный для локальных измерений величины pH почвы или активности ионов (например, NO_3^- или K^+) на заданной глубине. На **рис. 1б** показано расположение модуля для беспроводного мониторинга матричного

потенциала почвенной влаги и температуры почвы на четырех глубинах с 15-минутным интервалом. Хотя измерения в одной точке и могут быть полезны в ряде случаев, тематические почвенные карты высокого разрешения обычно создаются на основе измерений, выполненных при перемещении сенсорных систем в ландшафте. Эти наземные технологии почвенного зондирования в движении привели к созданию междисциплинарной области исследований, которая занимается разработкой необходимых инструментов для точного земледелия и других сфер деятельности, связанных с управлением природными ресурсами (Hummel et al., 1996; Sudduth et al., 1997; Adamchuk et al., 2004; Shibusawa, 2006). Наземные растительные сенсоры применяются для определения физиологических параметров (например, биомассы, содержания хлорофилла, высоты растений и др.), которые являются индикаторами пространственной неоднородности состояния сельскохозяйственных культур, включая, например, недостаток азота или водный стресс (Solarì et al., 2008; Samborski et al., 2009).

Сенсоры используются в дополнение и к «прогностическим», и к «реагирующим» подходам к дифференцированию агротехнологических приемов. При «реагирующем» (в реальном времени) способе размещения сенсора вносимая доза изменяется в ответ на изменение местных условий, фиксируемых сенсором во время внесения. Прогностическая (основанная на картограммах) стратегия, напротив, включает использование большого количества почвенных сенсоров для создания картограмм почвенных свойств, которые могут обрабатываться и интерпретироваться вне поля для принятия решений об оптимизации распределения применяемых средств химизации. К сожалению, измерения в реальном времени не всегда реалистичны из-за запаздывания во времени или же являются неприменимыми, когда пространственное распределение измеряемых почвенных свойств (например, удельной электропроводности) не меняется в течение сезона выращивания. С другой стороны, большая часть



Рис. 2. Опытный образец, состоящий из механических, электрических и оптических сенсорных компонентов (Университет Небраски-Линкольна, г. Линкольн, штат Небраска, США).

Таблица 1. Прогнозирование основных почвенных свойств при использовании разных принципов почвенного зондирования

Почвенные свойства	-----Почвенные сенсоры-----				
	Электрические и электромагнитные	Оптические и радиометрические	Механические	Акустические и пневматические	Электрохимические
Грансостав (ил, пыль и песок)	хорошо	отлично		грубо	
Органическое вещество или общий углерод	грубо	хорошо			
Влажность	хорошо	хорошо			
Степень засоления (натрий)	отлично				грубо
Уплотнение (плотность)			хорошо	грубо	
Глубина залегания ортштейнового горизонта	грубо		отлично	грубо	
pH		грубо			хорошо
Нитратный азот (общий азот)	грубо	грубо			отлично
Другие элементы питания (калий)		грубо			отлично
ЕКО (показатели буферных свойств)	отлично	отлично			

динамических параметров (например, индексы состояния растений) должна определяться в реальном времени для того, чтобы дифференцированное применение средств химизации могло выполняться своевременно для устранения причины, вызвавшей изменения в состоянии растений. Поэтому разные научно-исследовательские группы в своих последних работах сосредоточились на наиболее перспективном – интегрированном методе.

основные типы почвенных сенсоров, работающих в движении, и соответствующие агрономические свойства почв, от которых зависит величина сигнала. Во многих случаях приемлемая корреляция между показаниями сенсора и конкретными агрономическими свойствами почвы получалась для отдельных типов почвы или же достигалась в случае незначительного варьирования мешающих параметров.

На **рис. 2** в качестве примера показан прототип интегрированной системы кар-

тирования физических свойств почвы (integrated soil physical properties mapping system, ISPPMS), разработанный в Университете Небраски-Линкольна. На **рис. 3** приведен другой пример – передвижная сенсорная платформа (mobile sensor platform, MSP), которая объединяет в себе устройства по автоматическому измерению и картированию удельной электропроводности и pH почвы, работающие с приемником глобальной навигационной спутниковой системы (global navigation satellite system, GNSS) сантиметровой точности. В этих методах используются разные типы сенсоров. Система ISPPMS измеряет диэлектрические свойства почвы при использовании ёмкостного сенсора для обеспечения лучшей расшифровки значений механического сопротивления почвы, которые получены с помощью оснащенного тензометрами ножа, и измерений оптической отражательной способности почвы, выполненных с использованием набора фотодиодов. С практической точки зрения такая система может использоваться для учета пространственного варьирования влажности почвы и содержания органического вещества, а также плотности почвы. При использовании сельхозпроизводителями метода MSP, исходя из значений pH почвы, отображаются участки поля с кислой почвой, а измерения удельной электропроводности используются для косвенной оценки количества извести, необходимого для повышения pH почвы до требуемого уровня (с учетом почвенной серии). Использование приемника GNSS сантимет-



Рис. 3. Передвижная сенсорная платформа Veris® с блоками измерения-картирования удельной электропроводности и pH почвы («Верис Технолоджис, Инк.», г. Салина, штат Канзас, США), оборудованная приемником GNSS сантиметровой точности Trimble AgGPS® 442 («Тримбл Навигейшн Лтд.», г. Саннивейл, штат Калифорния, США).

Существует большое разнообразие конструктивных принципов, но большинство разработанных почвенных сенсоров, работающих в движении, основывается на одном из следующих методов измерений: 1) электрические и электромагнитные сенсоры, которые измеряют удельное электрическое сопротивление/удельную электропроводность или емкость, зависящие от состава анализируемой почвы; 2) оптические и радиометрические сенсоры, которые используют электромагнитные волны для определения уровня энергии, поглощаемой/отражаемой или излучаемой почвенными частицами; 3) механические сенсоры, измеряющие силы воздействия инструмента на почву; 4) акустические сенсоры, которые измеряют звук, производимый инструментом при взаимодействии с почвой; 5) пневматические сенсоры, оценивающие способность воздуха проникать в почву; 6) электрохимические сенсоры, использующие ионселективные мембраны, на которых создается электрическое напряжение в зависимости от активности отдельных ионов (например, иона водорода, K^+ , NO_3^- и др.).

В идеале почвенный сенсор должен отзываться на варьирование только одного почвенного показателя и тесно коррелировать с результатами общепринятого специфического аналитического метода. К сожалению, в действительности каждый разработанный сенсор реагирует на изменение нескольких почвенных свойств. Разделение их влияния является сложной задачей; процесс зависит от многих факторов, характерных для конкретного региона. В **табл. 1** обобщены

ровой точности позволяет сельхозпроизводителю получить качественную карту высот поля. Для незасоленных почв объединение информации о рельефе ландшафта с результатами геофизических измерений, таких как удельная электропроводность, дает полезную информацию о пространственном варьировании водоудерживающей способности и величины потенциального смыва почвы.

В целом, результаты наземного зондирования почв обеспечивают получение недорогой информации о пространственном варьировании с высокой плотностью данных. Полученные карты интегрируются с цифровыми картами высот для отображения участков поля с существенно различающимися условиями произрастания сельскохозяйственных культур, а также для определения участков с целью целенаправленного отбора почвенных образцов. Отбор почвенных образцов и лабораторные анализы остаются крайне важными компонентами процесса картирования даже при использовании наземного зондирования. Однако количество образцов, необходимое для характеристики неоднородности поля, может быть гораздо меньшим, чем при систематическом дискретном отборе образцов, поскольку пространственная неоднородность многих почвенных свойств может быть с высокой степенью точности отображена с помощью почвенного зондирования в движении. В настоящее время ведутся исследования по определению наиболее эффективной стратегии отбора образцов для увеличения информативности почвенных сенсоров, работающих в движении (Lesch, 2005; Minasny and McBratney, 2006; de Gruijter, 2008; Adamchuk et al., 2008).

Растительные сенсоры используются для определения параметров, связанных с физическим размером сельскохозяйственных культур, при помощи механических, ультразвуковых и других методов наземного зондирования. Сенсоры, измеряющие оптическую отражательную способность, в последнее время стали широко применяться для измерения способности растительного покрова отражать свет в видимой и ближней инфракрасной областях спектра электромагнитного излучения. Исходя из физических размеров сельскохозяйственных культур, осуществляется дифференцированное внесение средств химизации в соответствии с прогнозируемой потребностью, тогда как зондирование состояния растений применяется для корректировки системы применения удобрений и/или полива в течение сезона с целью поддержания требуемой доступности элементов питания и/или воды. Однако было отмечено, что при изменении почвенных условий в течение сезона на разных участках поля может потребоваться применение разных доз удобрений с учетом пространственных различий в отзывчивости растений.

Заключение

Информация о внутривидовом варьировании различных почвенных показателей очень важна для процесса принятия решений в точном земледелии.

Наземное зондирование почвы в движении является наиболее перспективным способом получения столь необходимых измерений основных почвенных свойств с высокой плотностью точек измерения. Системы наземного зондирования почв основаны на таких методах измерения, как электрические и электромагнитные, оптические и радиометрические, механические, акустические, пневматические и электрохимические. Основное преимущество зондирования в движении – возможность количественной оценки внутривидовой гетерогенности (неоднородности) почвы и корректировки подходов к получению других данных и, соответственно, к агротехнике. Интеграция различных систем зондирования на мульти-сенсорных платформах позволяет лучше прогнозировать агрономические показатели почвы. Дополнительные опции по зондированию растений позволяют сельхозпроизводителям использовать полученные измерения для корректировки агротехнических операций в течение сезона в режиме реального времени.

Д-р Адамчук – адъюнкт-профессор кафедры проектирования биологических систем Университета Небраски-Линкольна, e-mail: vadamchuk2@unl.edu

Перевод с английского под редакцией В.В. Носова, С.Е. Ивановой.

Литература

- Adamchuk, V.I., J.W. Hummel, M.T. Morgan, and S.K. Upadhyaya. 2004. Computers and Electronics in Agriculture, 44: 71–91.
- Adamchuk, V.I., R.A. Viscarra Rossel, D.B. Marx, and A.K. Samal. 2008. Enhancement of on-the-go soil sensor data using guided sampling. In Proceedings of the Ninth International Conference on Precision Agriculture, Denver, Colorado, 20-23 July 2008, ed. R. Kholsa. Fort Collins, Colorado: Colorado State University (CD publication, 13 pages).
- de Gruijter, J.J., A.B. McBratney, and J. Taylor. 2008. Sampling for high resolution soil mapping. In Proceedings of the First Global Workshop on High Resolution Digital Soil Sensing and Mapping, 5-8 February 2008, The University of Sydney, Australia.
- Hummel, J.W., L.D. Gaultney, and K.A. Sudduth. 1996. Computers and Electronics in Agriculture, 14: 121–136.
- Lesch, S.M. 2005. Computers and Electronics in Agriculture, 46(1), 153–180.
- McBratney, A., B. Whelan, T. Ancev, and J. Bouma. 2005. Precision Agriculture, 6: 7-23.
- Minasny, B. and A.B. McBratney. 2006. Computers and Geosciences 32(9), 1378-1388.
- Robert, P.C. 1993. Geoderma, 60: 57-72.
- Samborski, S.M., N. Tremblay, and E. Fallon. 2009. Agron. Journal, 101: 800-816.
- Shibusawa, S. 2006. Soil sensors for precision agriculture. In Handbook of Precision Agriculture. Principles and Applications, A. Srinivasan, ed., 57-90. Food Products Press, New York, New York, USA.
- Solari, F., J. Shanahan, R. Ferguson, J. Schepers, and A. Gitelson. 2008. Agron. Journal, 100: 571–579.
- Sudduth, K.A., J.W. Hummel, and S.J. Birrell. 1997. Sensors for site-specific management. In The State of Site-Specific Management for Agriculture, F.T. Pierce and E.J. Sadler, eds., 183-210. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, USA.