

Применение геофизических методов в сельском хозяйстве

Краткий обзор
Барри Дж. Аллред, USDA/ARS, Колумбус, Огайо
Роберт С. Фрилэнд, университет Теннесси, Ноксвилл

Параметры, системы счисления, а также сложности сельскохозяйственной геофизики

В последнее время геофизические методы находят себе самое широкое прикладное применение в агроэкосистемах. Термин Агроэкосистема может быть просто определен, как пространственно и функционально постоянная ландшафтная единица, предназначенная для нескольких типов сельскохозяйственной деятельности (например, растениеводство, разведение домашних животных, лесное хозяйство, разведение газонов и т.д.). На рисунке 1 показаны некоторые примеры агроэкосистем, где могут быть применены геофизические методы и где уже они активно используются.

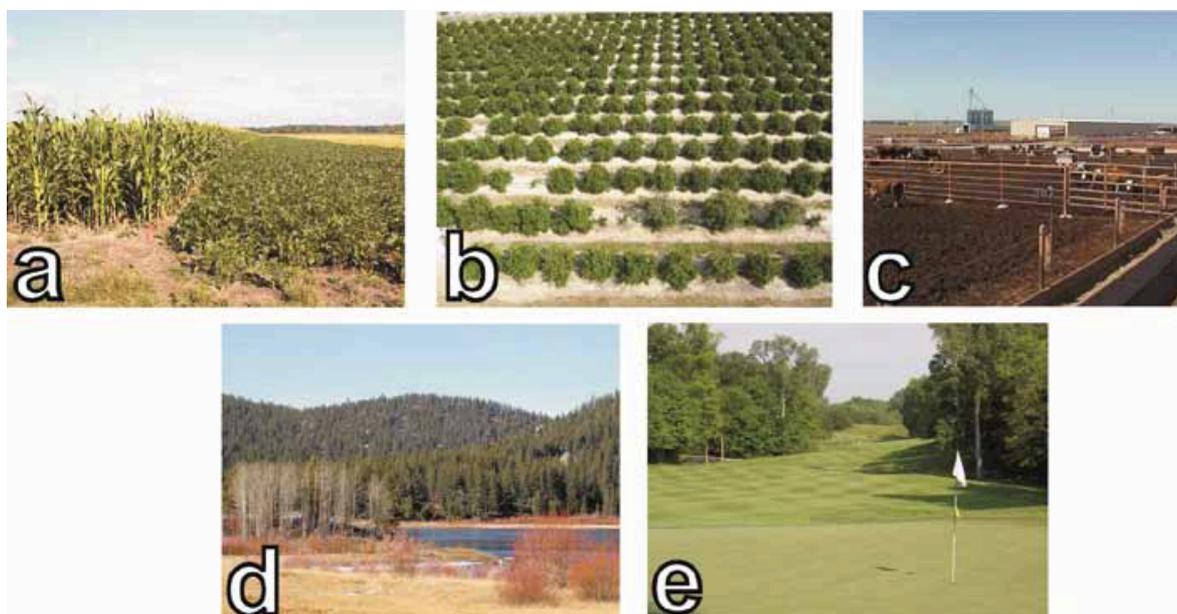


Рисунок 1. Примеры агроэкосистем, где применяются геофизические методы. А) фермерские поля, Б) сады, С) загоны для откорма скота, Д) лесное хозяйство, Е) поля для гольфа.

Масштаб величин, получаемых геофизическими методами в сельском хозяйстве, может быть очень незначительным, порядка сантиметров, как, например, в случае исследования болезней ствола дерева (Хагрей, 2007) или визуализация развития корнеплодов под землей (Константинович и другие, 2008). Геофизическое исследование почвы часто сосредотачивается для слоя - от поверхности земли до глубины 2-х метров. Этот глубинный интервал содержит подробную информацию о профиле почвы, включая корневую систему посевов (Allred и другие, 2008).

Следует отметить что при небольшой глубине исследований площади сельскохозяйственных геофизических исследований почв могут варьироваться достаточно широко: от экспериментальных точек измерения (10-100 квадратных метров) до фермерских полей (от 10 до сотни гектаров), а также теоретически до границ водоразделов (от 10 до 1000 квадратных километров). Что касается использования методов геофизики в сельском хозяйстве - в основном это методы, обеспечивающие небольшие глубины

исследований. При этом существует много параллельных задач, которые требуют возможности проводить исследования на глубинах, превышающих 5 м, например для картирования уровня грунтовых вод и пр.

Хочется отметить, имеется ряд сложностей, которые присущи геофизике сельского хозяйства, с которыми не всегда сталкиваются при применении геофизических методов в других отраслях. Одной из таких проблем является неустановившаяся природа определенных почвенных условий, которые влияют на геофизические измерения. Например, на кажущуюся электрическую проводимость (ЭП) почвы, измеряемую с помощью методов сопротивлений и индукционными методами, значительное влияние оказывает температура и влажность. Значения температуры и влажности могут заметно изменяться в течение дней или даже часов. Условия влажности также регулируют относительную диэлектрическую проницаемость почвы; тем самым влияя на результаты измерения георадарами. На измеренную ЭП может дополнительно влиять уровень питательных веществ в слое почвы и ее засоленность, данные параметры могут изменяться как незначительно за длительный период времени, так и быстро при проведении ирригации почвы или в случае внесения удобрений. Другие свойства почвы, влияющие на ЭП, изменяются намного медленнее, и к этой категории относятся такие свойства, как рН фактор, количество и тип глинистых минералов, содержание органического вещества, количество и тип полезных ископаемых, скорость обмена катионами, специфика поверхности, и т.д.

Другой сложностью сельскохозяйственной геофизики является то, что параметры почвы, определяющие геофизические измерения, изменяются не только во времени, но также и пространственно, часто показывая существенные изменения на очень коротких горизонтальных и вертикальных расстояниях. Для незасоленных почв без внесенных удобрений было отмечено, что, хотя средние значения ЭП для сельскохозяйственной площади могут меняться в зависимости от изменений температуры почвы и влажности, пространственно ЭП непосредственно в сельскохозяйственной области имеет тенденцию оставаться относительно неизменной в течение долгого времени, независимо от температуры и небольших изменений гидрологических условий. Таким образом, пространственные изменения ЭП регулируются более устойчивыми свойствами почвы (Banton и другие, 1997; Лунд и другие, 1999; Farahani и Buchleiter, 2004; Farahani и другие, 2005; Allred и другие, 2005a; Allred и другие, 2006). Во многих случаях ЭП связана с количественным выражением засоленности почвы (Рхоудес и Ингвэлсон, 1971; Lesch и другие, 1992); также существуют комплексные связи между ЭП и другими свойствами почвы (Джонсон и другие, 2001; Британский и другие, 2005a; Карролл и Оливер, 2005; Британский и другие, 2009).

Основные геофизические методы, используемые для сельского хозяйства

Существует три геофизических метода, наиболее часто используемые в сельском хозяйстве; это метод сопротивлений, метод электромагнитной индукции (EMI), и георадиолокационный метод (GPR). Специально для сельского хозяйства была разработана аппаратура непрерывного измерения удельного сопротивления со встроенной системой глобального позиционирования (GPS). Стальные диски, разрезающие поверхность почвы, используются как токопроводящие или потенциальные электроды. Такая система измерения сопротивления может иметь одну или несколько четырехэлектродных установок, обеспечивающих поверхностное исследование глубиной

от 0,3 до 2-х метров в короткие промежутки времени (~ 1 раз в секунду) или дискретные замеры электропроводности почвы, производимые через длительные интервалы. Каждая точка измерения может привязываться к GPS координатам. Следовательно, эти системы методов сопротивлений с применением быстрого измерения ЭП вместе с GPS приемниками дают возможность производить замеры на больших полях в сравнительно короткий промежуток времени. Неудобством такой системы является необходимость постоянного гальванического контакта с грунтом, а также требование к содержанию дисков-электродов.

На рисунке 2 показана аппаратура непрерывного измерения удельного сопротивления с гальваническим контактом для сельского хозяйства.



Рисунок 2. Пример непрерывного измерения удельного сопротивления с гальваническим контактом; (а) Veris 3100 Система картирования электропроводности (Veris Technologies, Салина, Канзас, США) и (б) крупный план стальных дисков, используемых в качестве электродов Veris 3100.

Существует ряд приборов для измерения электромагнитной индукции (ЭМИ), подходящих для использования в сельском хозяйстве. Расстояние между катушек у таких приборов приблизительно 1 м, и соответственно эффективная глубина исследований составляет до полутора метров, приборы основаны на методе Макнэйла (1980). Вертикальная, горизонтальная, и перпендикулярная дипольная ориентация передатчика и приемника измерителя сопротивления грунта могут обеспечить различные глубины исследования электропроводности. В большинстве своем аппаратура измерения электромагнитной индукции может быть легко объединена с приемниками GPS для обеспечения позиционирования проводимых измерений. Подобные системы измерения электропроводности обеспечивают точное и оперативное картирование кажущейся удельной электропроводности на больших земельных участках. Используемые для картирования измерители электропроводности грунта также могут быть использованы для измерения магнитной восприимчивости, показатели которой могут быть с успехом применены для оценки содержания влаги в почве (Grimley и Vepraskas, 2000; Grimley и другие, 2008; Ван и другие, 2008). На рисунке 3 показаны два примера измерения сопротивления земли, используемые в сельском хозяйстве.

Системы GPR (георадары), используемые в агроэкосистемах, обычно имеют антенны с частотами в диапазоне от 100 МГц до 1.5 ГГц. Этот частотный диапазон подходит для большинства сельскохозяйственных исследований, целью которых является изображение поверхностных свойств и локализация объектов в пределах 2-х метров от поверхности земли. Ожидаемая глубина залегания и размер объекта определяют

используемую частоту антенны. Например, антенны на 250 МГц используются при определении расположения подпочвенных дренажных труб диаметром 20 см на глубине 1.5 м. в суглинистых или илистых почвах, в то время как применение антенны на 1.5 ГГц дает хороший результат при исследовании корней дерева толщиной 0.5 см в глубинах до 0.5 м. в истощенных, песчаных почвах. К тому же, как в случае с методом сопротивлений и системами электромагнитной индукции, большинство георадаров может быть объединено с GPS приемниками для позиционирования измерений; благодаря быстрому процессу измерения георадары, объединенные с приемниками GPS, способны зондировать большие территории земли в относительно короткий срок. Хотя методы сопротивления, электромагнитной индукции и георадиолокации безусловно являются преобладающими геофизическими методами, в настоящее время используются и другие геофизические методы: магнитометрия, метод естественного поля, сейсмика. Информацию по использованию различных геофизических методов в сельском хозяйстве можно найти в Allred и другие (2008).



Рисунок 3. Примеры аппаратуры измерения проводимости земли в сельском хозяйстве в агроэкосистемах;

(a) DUALEM-1S (DuaLEM Inc., Канада)

(b) EM38-MK2 (Geonics Limited, Канада);

(c) ЭМС «Немфис» (ИНГГ СО РАН, Россия).

История развития сельскохозяйственной геофизики

Самые ранние исследования в области сельскохозяйственной геофизики относятся к 30-м и 40-м годам прошлого столетия, и эти работы были сосредоточены в области изучения содержания воды в почве посредством измерения электрической проводимости грунтов с помощью методов сопротивления (Маккоркл, 1931; Эдлефсон и Андерсон, 1941; Кирхэм и Тэйлор, 1949). Работы по определению содержания воды в почве, используя методы сопротивления, а теперь и методы электромагнитной индукции (EMI), и георадиолокации (GPR), могут обеспечить решение задач оценки результатов ирригационного планирования и контроля за дренажом на сельскохозяйственных полях. Начиная с 1960 года применение геофизических методов в сельском хозяйстве получает дополнительный импульс, особенно в 1970-м году, с момента начала применения методов удельного сопротивления для оценки засоленности почв (Shea и Luthin, 1961; Роудес и Ингвэлсон, 1971; Хэльворсон и Родос, 1974; Rhoades и другие, 1976). Применение методов удельного сопротивления, а теперь и индукционных методов позволило успешно внедрить геофизические методы для изучения степени засоленности почвы, чтобы начатые мероприятия по осушению не наносили вред будущему урожаю вследствие повышения солености почвы. Одной из самых ярких разработок в геофизике для определения солености является зондирование с воздуха для оценки рисков засоленности почвы и принятия управленческих решений для больших сельскохозяйственных площадей (Пэйн и другие, 1999; Джордж и Вудгейт, 2002; Beirwirth и Brodie, 2006). Начиная с конца 1970-ых и начала 1980-ых получает развитие разработка георадаров, а также общественная программа картирования различных параметров почвы (Коллинз и другие, 1986; Коллинз и Дулиттл, 1987; Doolittle, 1987; Schellentrager и другие, 1988). В этом отношении георадар в то время оказался чрезвычайно ценным в части сокращения времени зондирования почвы, обеспечивая более точное картирование объектов.

В середине 1990-ых картирование электропроводности с помощью методов сопротивления и электромагнитной индукции становится все более важным инструментом сельского хозяйства. Точность показателей сельского хозяйства – это развивающийся сельскохозяйственный тренд, сочетающий в себе геопространственные базы данных, современные сельскохозяйственные технологии, географические информационные системы (ГИС) и приемники системы глобального позиционирования (GPS). Эти технологии необходимы для пространственного контроля внесения удобрения на полях, проведения мероприятий по улучшению почвы, определение содержания пестицидов и даже проведение пахотных работ (Национальный исследовательский совет, 1997; Морган и Эс, 1997). Фермеры могут извлекать следующую выгоду от использования этих методов: повышение урожайности или уменьшение затрат. Дополнительное преимущество – эффективная защита окружающей среды. Так как точный расчет в сельском хозяйстве дает возможность внесения оптимального количества удобрений, пестицидов и прочих агрохимикатов в различные части полей, меньшее количество агрохимикатов и осадков будет проходить через подпочвенный дренаж и поверхность почвы. В свою очередь, уменьшение веществ, загрязняющих почву и осадков уменьшает неблагоприятное экологическое воздействие на водную систему. Так, в основном, применение высокоточной разведки позволяет разделять сельскохозяйственные поля на различные управленческие зоны, чтобы в полной мере оптимизировать экономическую выгоду и мероприятия по защите окружающей среды.

Горизонтальные пространственные изменения в электропроводности обычно хорошо коррелируют с горизонтальными изменениями в плодородности (Jaynes и в других, 1995a; Лунд и другие, 1999) (см. иллюстрацию4) и свойствами почвы (Vanton и другие, 1997; Лунд и другие, 1999; Карролл и Оливер, 2005). Как следствие, картирование электропроводности с применением методов сопротивления и геофизических методов электромагнитной индукции может зачастую использоваться для картирования распространения свойств почвы, которые изменяются в процессе различных воздействий. Карты электропроводности могут использоваться для разделения сельскохозяйственных полей на различные управленческие зоны (применение различных доз химикатов), чтобы оптимизировать использование земель и защитить окружающую среду. Следует заметить, что развитие в 1990-ых доступности персональных компьютеров, технологий для обработки и хранения больших объемов данных, системы глобального позиционирования и геоинформационных систем (ГИС) позволило широко применять в сельском хозяйстве геофизические методы и методы точного прогнозирования.

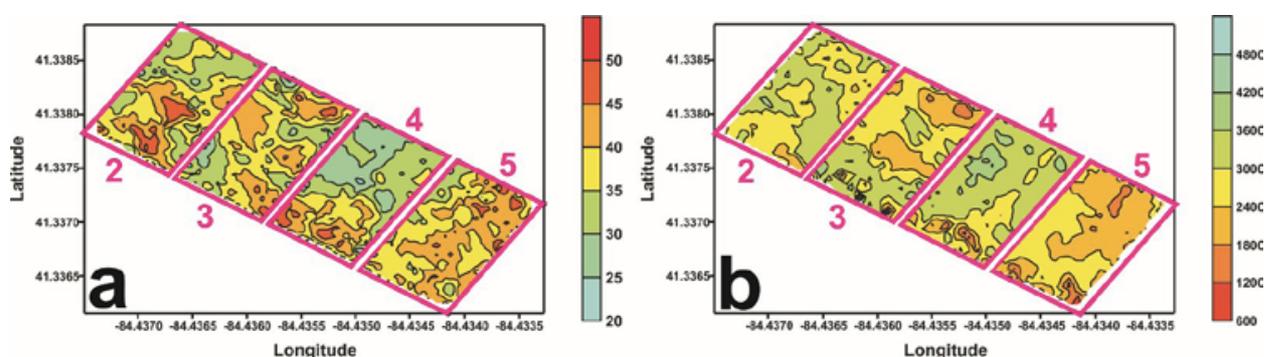


Рисунок 4. Сравнение электрической проводимости почвы (ЕСа) и полей с посевами сои с сельскохозяйственного испытательного полигона около Дефианса, Огайо; (а) ЕСа наносят на карту, данные в миллиСименс/м. и (б) карту урожая сои с данными в кг/га. Пространственная корреляция (r) между ЕСа и урожаем сои -0.52.

Современные геофизические сельскохозяйственные исследования

В последние 15 лет наметилась тенденция к расширению исследований, связанных с потенциальным применением геофизики в сельском хозяйстве. Большинство этих научных исследований опять были сосредоточены на исследовании метода сопротивлений, индукционных методов, и метода георадиолокации; однако, теперь проводятся исследования возможности использования в сельском хозяйстве других геофизических методов, таких как магнитометрия, метод естественного поля и сейсмика. Помимо контроля грунтовых вод, оценки засоленности, картографии обследования почвы, и прогнозируемого земледелия - геофизические методы теперь используются в более широком диапазоне для решения дополнительных сельскохозяйственных задач включая лесное хозяйство, возделывание высококачественных зерновых культур, управление отходами животноводства, описание гидрологических характеристик почвы, а также локализация и оценка подземной инфраструктуры, и т.д. В Таблице 1 представлены часть наиболее современных исследований, связанных применениями геофизических методов для решения с сельскохозяйственных задач.

Будущие тенденции в сельскохозяйственной геофизике

Сельскохозяйственная геофизика - это быстро развивающаяся дисциплина, и поэтому в будущем ожидается развитие новых инновационных методов, оборудования, и методик. В этом отношении, на основании прежде всего исследований Allred и других (2008), а также обсуждениях, проводимых в научных сообществах, был представлен следующий список, который определяет будущие тенденции в сельскохозяйственной геофизике.

1. Открытие новых областей применения геофизических методов, которые уже используются в сельском хозяйстве; метод сопротивлений, индукционных методов, и георадиолокации.

2. Геофизические методы, традиционно не используемые в прошлом в сельскохозяйственных целях, найдут себе применение в будущем. Геофизические методы, которые вероятнее всего будут использоваться в сельском хозяйстве – это, магнитометрия, метод естественного поля, и сейсмика. Также существует возможность применения в сельском хозяйстве таких геофизических методов, как ядерный магнитный резонанс, вызванная поляризация, сейсмоэлектрика, и т.д.

3. Использование приемников системы глобального позиционирования (GPS), станет нормой, особенно это может касаться систем позиционирования в реальном времени, (RTK) GPS, которые позволят проводить геофизические измерения с максимальной горизонтальной и вертикальной точностью в несколько сантиметров или меньше. Вспомогательные приборы на основе систем видео слежения за процессами, или даже приближенный расчет расстояния интервала между поперечными разрезами, объединенные с точной системой глобального позиционирования GPS, смогут обеспечить эффективное проведения геофизических исследований на больших сельскохозяйственных полях без размещения маяков сетки измерения на земной поверхности. Для некоторых геофизических методов компьютерные процедуры обработки, используемые для горизонтальной картографии измерений, могут потребовать некоторой модификации для ввода данных, собранных вдоль профилей с нерегулярными ориентациями и шагом между точками измерений.

4. Геофизическая съемка более чем одним методом станет стандартом благодаря разнообразию полевой информации, требуемой для принятия правильных управленческих решений в области сельского хозяйства. Мультисенсорные системы, основанные на единичном геофизическом методе, уже разработаны, и эти системы, конечно, выгодны для сельского хозяйства. Примеры - системы на основе электромагнитной индукции (EMI), включая системы мультичастотного индукционного зондирования (МЧЗ), и георадиолокационные системы (GPR), имеющие более одного набора антенн, работающих на более чем одной частоте; а также аппаратуру реализующую методы сопротивлений, содержащие более четырех электродов. В будущем для сельскохозяйственных целей должны развиваться системы, базирующиеся на нескольких геофизических методах. Эти системы могут быть непосредственно интегрированы с сельскохозяйственной техникой что позволит оперативно принимать точные сельскохозяйственные решения.

Геофизический метод	Сельскохозяйственное применение	Источники
Метод сопротивлений	Картирование и классификация дренажных систем	Kravchenko и др. 2002
Метод сопротивлений	Визуализация разломов и трещин	Samouelian и др 2003
Электромагнитная индукция (EMI / ЭМИ) Много-частотное индукционное зондирование (EMFIS / МЧЗ)	Определение глубины глинистого слоя	Doolittle и др, 1994 Sudduth и др, 2010
ЭМИ, МЧЗ	Картирование песчаного слоя на полях граничащих с реками.	Kitchen и др, 1996
ЭМИ, МЧЗ	Оценка коэффициентов распределения гербицидов в почве	Jaynes и др, 1995
ЭМИ, МЧЗ	Мониторинг питательных веществ после воздействия удобрениями	Eigenberg и Nienaber, 1998 Eigenberg и др, 2002; 2010 Woodbury и др, 2010
Георадиолокация (GPR / Георадар), МЧЗ	Локализация уровня грунтовых вод на профиле	Freeland и др, 1998 Manstein и др, 2010
Георадар	Георадарная оценка пригодности почв	Doolittle и др, 1994
Георадар	Оценка биомассы корневой системы деревьев	Butnor и др, 2001; 2003 Barton и Montagu, 2004 Konstantinovich и др, 2007; 2008
Сейсмика	Определение потенциала грунтовых вод	Lu и Sabatier, 2009
Сейсмика	Определение плотности почв	Lu и др, 2004
Метод сопротивлений, ЭМИ, МЧЗ	Локализация песчаных линз в в аллювиальных почвах	Doolittle и др, 2002 Manstein и др, 2007
Метод сопротивлений, Сейсмика	Визуализация поперечного сечения стволов деревьев	al Hagrey, 2007

Геофизический метод	Сельскохозяйственное применение	Источники
Метод сопротивлений, ЭМИ, МЧЗ, Электротомография, Георадар, Сейсмика	Оценка содержания грунтовых вод и мониторинг движения грунтовых вод	Zhou и др, 2001 Grote и др, 2003; 2010 Huisman и др, 2003 Blum и др, 2004 Maineult и др, 2004 Lunt и др, 2005 Lambot и др, 2006 Weihermuller и др, 2006 Tromp-van Meervekd и McDonnell, 2009 Manstein и др, 2010
Георадар, МЧЗ, Магнитометрия	Поиск и локализация коммуникаций включая дренажные систем на землях сельскохозяйственного назначения	Boniak и др, 2002, Allred и др, 2004; 2005b; 2005c Rogers и др, 2005; 2006 Allred и Redman, 2010 Manstein и др, 2002

5. Комплексование геофизических методов, объединенных и анализируемых совместно с другой геопространственной информацией, может обеспечить сельскохозяйственный обзор, который невозможно получить, анализируя результаты каждого метода в отдельности. Геостатистические аналитические методы могут быть особенно полезными в этом отношении. Географические информационные системы (ГИС) практически очень хорошо адаптированы к интеграции и геостатистическому анализу многократных геофизических и негеофизических пространственных наборов данных. Следовательно, ГИС будет играть все большую и большую роль в анализе геофизических данных, собранных в агроэкосистемных установках. Кроме того, в то время как практика точного земледелия будет расти, ожидается увеличение потребности ввода данных в ГИС для принятия надлежащих управленческих решений в отношении различных областей сельского хозяйства.

6. Программное обеспечение экспертной системы будет разрабатываться для конкретных сельскохозяйственных применений, для обеспечения автоматического анализа и интерпретации геофизических данных.

7. Вероятнее всего, будет существенное увеличение использования программного обеспечения для моделирования инверсии и средств визуализации данных, предназначенных для анализа сельскохозяйственных геофизических данных.

8. Будут развиваться томографические процедуры для получения геофизических данных применительно к сельскому хозяйству. Обычно проведение геофизических исследований на полях в течение сельскохозяйственного сезона затруднено из-за роста и развития растений. Томографические процедуры сбора данных и анализа - потенциальное решение этой проблемы, доступ к исследованиям в пределах полевого горизонтального пространственного образца будет определяться информацией, полученной геофизическими датчиками, находящимися над полем. Томографические процедуры сбора данных и их анализа могут также предоставить ценную геофизическую информацию для

сценариев меньшего масштаба а также для обстоятельств, когда доступ к полям не составляет проблему.

9. Возникнет большая потребность обучения сельскохозяйственного сообщества возможностям применения геофизики в сельском хозяйству.

Резюме и Заключение

Геофизические методы могут быть важным инструментом для решения различных сельскохозяйственных задач. В прошлом в сельскохозяйственной геофизике использовались только методы сопротивлений, электромагнитной индукции и георадиолокации для контроля содержания влаги в почве, оценки солености почвы, картографии почвы и точного земледелия. В настоящее время сельскохозяйственные применения методов удельного сопротивления, индукционных методов, и георадиолокации продолжает быстро развиваться, кроме того, такие геофизические методы как магнитометрия, метод естественного поля и сеймики начинают находить сельскохозяйственное применение. Будущее развитие сельскохозяйственной геофизики, вероятно, будет включать: (1) дальнейшее развитие методов, основанных на методе сопротивлений, электромагнитной индукции, и георадиолокации; (2) увеличение применения геофизических методов, которые ранее традиционно не применялись в сельском хозяйстве; (3) интеграция геофизического оборудования с приемниками системы глобального позиционирования в реальном времени (RTK-GPS); (4) разработка мульти-сенсорного геофизического оборудования; (5) использование географических информационных систем (ГИС) для расширенных сельскохозяйственных интерпретаций, основанных на объединенном анализе многократных геофизических и негеофизических пространственных наборов данных; (6) развитие программного обеспечения экспертной системы сельскохозяйственной геофизики; (7) увеличение использования моделирования, инверсии и программного обеспечения визуализации и оценки сельскохозяйственных геофизических данных; (8) применение томографических процедур; и (9) обучение сельскохозяйственного сообщества. Будущее развитие сельскохозяйственной геофизики потребуют тесного сотрудничества сельскохозяйственных, инженерно-геофизических и научных сообществ.

Список используемой литературы

- al Hagrey, S. A., 2007, Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity: *J. Exper. Botany.*, v. 58, p. 839-854.
- Allred, B. J., Fausey, N. R., Peters, Jr., L., Chen, C., Daniels, J. J., and Youn, H., 2004, Detection of buried agricultural drainage pipe with geophysical methods: *Applied Engineering in Agriculture*, v. 20, no. 3, p. 307-318.
- Allred, B. J., Ehsani, M. R., and Saraswat, D., 2005a, The Impact of temperature and shallow hydrologic conditions versus soil properties on near-surface electromagnetic induction based electrical conductivity measurements: *Trans. ASAE.*, v. 48, p. 2123-2135.
- Allred, B. J., Daniels, J. J., Fausey, N. R., Chen, C., Peters, Jr., L., and Youn, H., 2005b, Important considerations for locating buried agricultural drainage pipe using ground penetrating radar: *Applied Eng. Agric.*, v. 21, p. 71-87.
- Allred, B. J., Redman, D., McCoy, E. L., and Taylor, R. S., 2005c, Golf course applications of nearsurface geophysical methods: A case study: *J. Environ. Eng. Geophys.*, v. 10, p. 1-19.
- Allred, B. J., Ehsani, M. R., and Saraswat, D., 2006, Comparison of electromagnetic induction, capacitively coupled resistivity, and galvanic contact resistivity methods for soil electrical conductivity measurement: *Applied Eng. Agric.*, v. 22, p. 215-230.
- Allred, B. J., Ehsani, M. R., and Daniels, J. J., 2008, Chapter 1 – General considerations for geophysical methods applied to agriculture, In: *Handbook of Agricultural Geophysics*, Allred, B.J., Daniels, J. J., and Ehsani, M. R. (eds): CRC Press LLC. Boca Raton, Florida. p. 3-16.
- Allred, B., Clevenger, B., and Saraswat, D., 2009, Application of GPS and near-surface geophysical methods to evaluate agricultural test plot differences: *FastTIMES*, v. 14, p. 15-24.
- Allred, B. J. and Redman, D., 2010, Agricultural drainage pipe assessment using ground penetrating radar: Impact of pipe condition, shallow hydrology, and antenna characteristics: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 15, no. 3, p. 119-134.
- Banton, O., Seguin, M. K., and Cimon, M. A., 1997, Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 61, p. 540-548.
- Barton, C. V. M, and Montagu, K. D., 2004, Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions: *Tree Physiology*, v. 24. p. 1323-1331.
- Bierwirth, P. N. and Brodie, R. S., 2006, Developing a Salt Source Model for the Murray-Darling Basin from Natural Soil-Radioactivity and Geological Data: Australian Government Bureau of Rural Sciences, Canberra, Australia.
- Blum, A., Flammer, I., Friedli, T., and Germann, P., 2004, Acoustic tomography applied to water flow In unsaturated soils: *Vadose Zone J.*, v. 3, pp. 288-299.
- Boniak, R., Chong, S. K., Indorante, S. J., and Doolittle, J. A., 2002, Mapping golf course green Drainage systems and subsurface features using ground penetrating radar, In: *Proceedings of SPIE*, Vol. 4758, Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, Koppenjan, S.K. and Lee, H. (eds.): April 29 – May 2, 2002, Santa Barbara, CA, SPIE, Bellingham, WA, p. 477-481.
- Butnor, J. R., Doolittle, J. A., Kress, L., Cohe, S., and Johnsen, K. H., 2001, Use of ground penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States: *Tree Physiology.*, v. 21, p. 1269-1278.

Butnor, J. R., Doolittle, J. A., Johnson, K. H., Samuelson, L., Stokes, T., and Kress, L., 2003, Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 67, p. 1607-1615.

Doolittle, J. A., 1987, Using ground-penetrating radar to increase the quality and efficiency of soil surveys, In: *Soil Survey Techniques*, SSSA Special Publication Number 20, Reibold, W. U. and Petersen, G. W. (eds.): Soil Science Society of America. Madison, WI. p. 11-32.

Doolittle, J. A., Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., and Indorante, S. J., 1994, Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods: *J. Soil and Water Cons.*, v. 49, p. 572-575.

Doolittle, J., Petersen, M., and Wheeler, T., 2001, Comparison of two electromagnetic induction tools in salinity appraisals: *J. Soil and Water Cons.*, v. 56, p. 257-262.

Doolittle, J. A., Minzenmayer F. E., Waltman, S. W., and Benham, E. C., 2003, Ground penetrating radar soil suitability maps: *J. Environ. Eng. Geophys.*, v. 8, p. 49-56.

Doolittle, J., Dobos, R., Peaslee, S., and Waltman, S., 2010, Revised ground-penetrating radar soil suitability maps: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 15, no. 3, p. 111-118.

Collins, M. E., Schellentrager, G. W., Doolittle, J. A., and Shih, S. F., 1986, Using ground-penetrating radar to study changes in soil map unit composition in selected Histosols: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 50, p. 408-412.

Collins, M. E. and Doolittle, J. A., 1987, Using ground-penetrating radar to study soil microvariability: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 51, p. 491-493.

Edlefsen, N. E. and Anderson, A. B. C., 1941, The four-electrode resistance method for measuring soil-moisture content under field conditions: *Soil Sci.*, v. 51, p. 367-376.

Eigenberg, R. A. and Nienaber, J. A., 1998, Electromagnetic survey of cornfield with repeated manure applications: *J. Environ. Qual.*, v. 27, p. 1511-1515.

Eigenberg, R. A., Doran, J. W., Nienaber, J. A., Ferguson, R. B., Woodbury, B. L., 2002, Electrical conductivity monitoring of soil condition and available N with animal manure and a cover crop: *Agric. Ecosys. Environ.*, v. 88, p. 183-193.

Eigenberg, R. A., Woodbury, B. L., Nienaber, J. A., Spiels, M. J., Parker, D. B., and Varel, V. H., 2010, Soil conductivity and multiple linear regression for precision monitoring of beef feedlot manure and runoff: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 15, no. 3, p. 175-184.

Farahani, H. J. and Buchleiter, G. W., 2004, Temporal stability of soil electrical conductivity in irrigated sandy fields in Colorado: *Trans. ASABE*, v. 47, p. 79-90.

Farahani, H. J., Buchleiter, G. W., and Brodahl, M. K., 2005, Characterization of apparent soil electrical conductivity variability in irrigated sandy and non-saline fields in Colorado: *Trans. ASAE.*, v. 48, p. 155-168.

Freeland, R. S., Reagan, J. C., Burnes, R. T., and Ammons, J. T., 1998, Sensing perched water using ground-penetrating radar- A critical methodology examination: *Applied Eng. Agric.*, v. 14, p. 675-681.

Freeland, R. S., Odhiambo, L. O., Tyner, J. S., Ammons, J. T., and Wright, W. C., 2006, Nonintrusive mapping of near-surface preferential flow: *Appl. Eng. Agric.*, v. 22, p. 315-319.

George, R. and Woodgate, P., 2002, Critical factors affecting the adoption of airborne geophysics for management of dryland salinity: *Exploration Geophysics*, v. 33, p. 84-89.

Gish, T. J., Dulaney, W. P., Kung, K.-J. S., Daughtry, C. S. T., Doolittle, J. A., and Miller, P.T., 2002, Evaluating use of ground-penetrating radar for identifying subsurface flow pathways: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 66, p. 1620-1629.

Grimley, D. A. and Vepraskas, M. J., 2000, Magnetic susceptibility for use in delineating hydric soils: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 64, p. 2174-2180.

Grimley, D. A., Wang, J., Liebert, D. A., and Dawson, J. O., 2008, Soil magnetic susceptibility: A quantitative proxy of soil drainage for use in ecological restoration: *Restoration Ecology*, v. 16, p. 657-667.

Grote, K., Hubbard, S., and Rubin, Y., 2003, Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques: *Water Resources Research*, v. 39, p. 1321-1333.

Grote, K., Anger, C., Kelly, B., Hubbard, S., and Rubin, Y., 2010, Characterization of soil water content variability and soil texture using GPR groundwave techniques: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 15, no. 3, p. 93-110.

Halvorson, A. D. and Rhoades, J. D., 1974, Assessing soil salinity and identifying potential saline seep areas with field soil resistance measurements: *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 38, p. 576-581.

Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D., and Annan, A. P., 2003, Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review: *Vadose Zone J.*, v. 2, p. 476-490.

Jaynes, D. B., Colvin, T. S., and Ambuel, J., 1995a, Yield mapping by electromagnetic induction, In: *Proceedings of Site-Specific Management for Agricultural Systems: Second International Conference*, Robert, P. C., Rust, R. H., and Larson, W. E. (eds.): March 27-30, 1994. St. Paul, MN. ASA, CSSA, and SSSA. Madison, WI, p. 383-394.

Jaynes, D. B., Novak, J. M., Moorman, T. B., and Cambardella, C. A., 1995b, Estimating herbicide partition coefficients from electromagnetic induction measurements: *J. Environ. Qual.*, v. 24, pp. 36-41.

Johnson, C. K., Doran, J. W., Duke, H. R., Wienhold, B. J., Eskridge, K. M., and Shanahan, J. F., 2001, Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 65, p. 1829-1837.

Kaffka, S. R., Lesch, S. M., Bali, K. M., and Corwin, D. L., 2005, Site-specific management in saltaffected sugar beet fields using electromagnetic induction: *Computers and Electronics Agric.*, v. 46, p. 329-350.

Kirkham, D. and Taylor, G. S., 1949, Some tests of a four-electrode probe for soil moisture measurement: *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 14, p. 42-46.

Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., and Drummond, S. T., 1996, Mapping of sand deposition from 1993 Midwest floods with electromagnetic induction measurements: *J. Soil and Water Cons.*, v. 51, p. 336-340.

Kravchenko, A. N., Bollero, G. A., Omonode, R. A., and Bullock, D. G., 2002, Quantitative mapping of soil drainage classes using topographical data and soil electrical conductivity: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 66, p. 235-243.

Konstantinovic, M., Wöckel, S., Lammers, P. S., Sachs, J., and Martinov, M., 2007, Detection of root biomass using ultra wideband radar – An approach to potato nest positioning: *Agr. Eng. Intl.*, v. 9, Manuscript IT 06 003.

Konstantinovic, M., Wöckel, S., Lammers, P. S., and Sachs, J., 2008, UWB radar system for yield monitoring of sugar beet. *Trans. ASABE*, v. 51, p. 753-761.

Lambot, S., Weihermüller, L., Huisman, J.A., Vereecken, H., Vanclooster, M. and Slob, E.C., 2006, Analysis of air-launched ground-penetrating radar techniques to measure the soil surface water content: *Water Resources Research*, v. 42. W11403, doi:10.1029/2006WR005097.

Lesch, S. M., Rhoades, J. D., Lund, L. J., and Corwin, D. L., 1992, Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 56, p. 54-60.

Lu, Z., Hickey, C. J., and Sabatier, J. M., 2004, Effects of compaction on the acoustic velocity in soils: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 68, p. 7-16.

Lu, Z. and Sabatier, J. M., 2009, Effects of soil water potential and moisture content on sound speed: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 73, p. 1614-1625.

Lund, E. D., Colin, P. E., Christy, D., and Drummond, P. E., 1999, Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture, In: *Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture*, Robert, P. C., Rust, R. H., and Larson, W. E. (eds.): July 19-22, 1998. St.

Paul, MN. ASA, CSSA, and SSSA. Madison, WI. p. 1089–1100.

Lunt, I. A., Hubbard, S. S., and Rubin, Y., 2005, Soil moisture content estimation using groundpenetrating radar reflection data: *J. Hydrology*, v. 307, p. 254-269.

Maineult, A., Bernabé, Y., and Ackerer, P., 2004, Electrical response of flow, diffusion, and advection in a laboratory sand box: *Vadose Zone J.*, v. 3, p. 1180-1192.

McCorkle, W. H., 1931, Determination of Soil Moisture by the Method of Multiple Electrodes, Texas Agricultural Experiment Station Bulletin 426: Texas A & M University, College Station, TX.

McNeill, J. D., 1980, Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers, Technical Note TN-6: Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, Canada.

Morgan, M. and Ess, D., 1997, *The Precision-Farming Guide for Agriculturists*: John Deere Publishing, Moline, IL.

National Research Council. 1997. *Precision Agriculture in the 21st Century*: National Academy Press, Washington, D.C.

Paine, J. G., Dutton, A. R., and Blüm, M. U., 1999., *Using Airborne Geophysics to Identify Salinization in West Texas*, Report of Investigations No. 257: Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin, Austin, TX.

Rhoades, J. D. and Ingvalson, R. D., 1971, Determining salinity in field soils with soil resistance measurements: *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 35, p. 54-60.

Rhoades, J. D., Raats, P. A. C., and Prather, R. J., 1976, Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 40, p. 651-655.

Rogers, M. B., Cassidy, J. R., and Dragila, M. I., 2005, Ground-based magnetic surveys as a new technique to locate subsurface drainage pipes: A case study: *App. Eng. Agric.*, v. 21, p. 421-426.

Rogers, M. B., Baham, J. E., and Dragila, M. I., 2006, Soil iron content effects on the ability of magnetometer surveying to locate buried agricultural drainage pipes: *App. Eng. Agric.*, v. 22, p. 701-704.

Samouëlian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A., and Bruand, A., 2003, Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimeter scale: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 67, pp. 1319-1326.

Schellentrager, G. W., Doolittle, J. A., Calhoun T. E., and Wettstein, C. A., 1988, Using groundpenetrating radar to update soil survey information: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 52, p. 746-752.

Shea, P. F. and Luthin, J. N., 1961, An investigation of the use of the four-electrode probe for measuring soil salinity in situ: *Soil Sci.*, v. 92, p. 331-339.

Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Myers, D. B., and Drummond, S. T., 2010, Mapping depth to argillic soil horizons using apparent electrical conductivity: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 15, no. 3, p. 135-146.

Tromp-van Meerveld, H. J. and McDonnell, J. J., 2009, Assessment of multi-frequency electromagnetic induction for determining soil moisture patterns at the hillslope scale: *J. Hydrology*, v. 368, p. 56-67.

Wang, J., Grimley, D. A., Xu, C., and Dawson, J. O., 2008, Soil magnetic susceptibility reflects soil moisture regimes and the adaptability of tree species to these regimes: *Forest Ecology and Management*, v. 255, p. 1664-1673.

Weihermüller, L., Huisman, J. A., Lambot, S., Herbst, M., and Vereecken, H., 2006, Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques: *J. Hydrology*, v. 340, p. 205-216.

Woodbury, B. L., Eigenberg, R. A., Nienaber, J. A., and Spiehs, M. J., 2010, Soil-crop dynamic depth response determined from TDR of a corn silage field compared to EMI measurements: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 15, no. 3, p. 185-196.

Zhou, Q. Y., Shimada, J., and Sato, A., 2001, Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography: *Water Resources Research*, v. 37, p. 273-285.