

УДК 004+519.2+91+551

**Байесовские сети доверия для анализа доступности почвенной влаги**Россова А.С.<sup>1</sup>, Понькина Е.В.<sup>1</sup>, Бондарович А.А.<sup>1</sup>, Шмидт Г.<sup>2</sup><sup>1</sup>Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия<sup>2</sup>Университет Мартина Лютера Халле-Виттенберг, Халле (Саале), Германия[alyonarossova@gmail.com](mailto:alyonarossova@gmail.com), [ponkinaelena77@mail.ru](mailto:ponkinaelena77@mail.ru),[gerd.schmidt@geo.uni-halle.de](mailto:gerd.schmidt@geo.uni-halle.de), [andrej.bondarovich@yandex.ru](mailto:andrej.bondarovich@yandex.ru)**Аннотация**

В работе на основе данных почвенно-гидрологического и климатического мониторинга выполнена разработка байесовской сети доверия, использование которой позволило оценить чувствительность параметров влагообеспеченности растений под различными технологиями обработки почвы (No-Till и Deep Tillage). Оценки получены для условий сухой степи Алтайского края.

Вода занимает одну из главенствующих ролей в природе: обеспечивает физические и химические процессы, перемещение веществ в пространстве. Состояние воды в почве, процессы ее поступления, передвижения и расхода образуют водный режим, от которого зависят степень и характер потребления воды растениями и развитие процессов почвообразования [1]. Величина влаги, поступившей на поверхность почвы, зависит от количества осадков и водно-физических свойств почвы: водоудерживающей и водоподъемной способностей, влагоемкости и водопроницаемости [2]. Главная характеристика водного режима почвы – это доступность почвенной влаги. В процессе своей жизни растения потребляют огромное количество воды, расходуя ее массу на транспирацию (испарение) и лишь небольшую долю на рост и метаболизм.

Анализ водного режима почв фокусирован на территории сухой степи Алтайского края (Кулундинская степь), где основным лимитирующим фактором урожайности культур является почвенная влага. Сухая степь является территорией с экстремальными условиями для сельского хозяйства, что характеризуется оценкой осадков за вегетацию от 244,6 до 300 мм за период 2013-2016 гг., низким уровнем гумуса, высокой гигроскопичностью (пылеобразные составляющие в почве). Температура за вегетацию в среднем составляет в среднем 17 °С, что влияет на проявление пыльных бурь. Наиболее увлажненным периодом является июль. По прогнозам гидрометеорологов средняя годовая температура на этой территории будет возрастать, периоды без осадков удлинятся, но сами осадки становятся более обильными [3].

В таких условиях особенно важным является изучение водного режима почв и выбор технологии обработки почвы, обеспечивающей наилучшие условия для роста и развития растений. В связи с этим, задачи разработки новых методов объективного сравнения водного режима почв, для разных используемых технологий обработки почвы являются актуальными. Таким образом, анализ реакций параметров, характеризующих доступность почвенной влаги, на применение различных технологий обработки почвы в условиях реального производства и различных климатических условиях является предметом исследования данной работы.

В рамках проекта «Кулунда» в сентябре 2012 г. на базе тестового хозяйства ООО КХ Партнер (Михайловский район, Алтайский край) был сформирован многофункциональный стационар почвенно-гидрологических наблюдений. Оборудование осуществляет измерение в реальном времени метеорологических данных и показателей водного и температурного режимов почв (температура, влажность, рF), все измерения выполняются на трех глубинах. Почвенные гидрологические станции (ПГС) позволяют анализировать и сравнивать изменение водного и температурного режимов почв при различных технологиях обработки почвы, в частности в проекте сравнению подлежат технология глубокого рыхления (Deep Tillage) и нулевая технология – без рыхления (No-Till).

Для анализа водного режима почв при использовании двух систем обработки пашни использованы методы анализа причинности (Causal Analysis) и численное моделирование системы причинных связей, описывающих связи между климатическими и почвенными параметрами в системе («Климат-Почва») в виде байесовской сети доверия (БСД).

БСД представляет ациклический граф, описывающий графически причинные связи в системе между множеством случайных переменных.

В настоящее время интерес к БСД возрастает в разных областях науки, в том числе в области экологии и природопользовании, сельском хозяйстве. БСД хорошо подходит для оценки прямых и непрямых эффектов изменения ожидаемых значений и условной плотности распределения в целевых узлах при варьировании состояний в родительских (причинных) узлах. Основные преимущества использования БСД по сравнению с методами регрессионного анализа следующие:

1. Обеспечивается визуальное представление структуры системы.
2. БСД способны быстро и эффективно моделировать сложные системы с большим количеством переменных. Если точное решение недоступно, то БСД могут максимально приблизить значение, основываясь на заложенных в них методах моделирования.
3. Большинство классических статистических методов не в состоянии справиться с отсутствующими значениями, т.е., если в одном из случаев отсутствует хотя бы одно значение переменной, случай отбрасывается, что приводит к значительной потере информации. Алгоритмы обучения БСД учитывают полную выборку независимо от наличия «пробелов» в данных.
4. Применение БСД не предполагает выдвижение и обоснование гипотез о наличии некоторой определенной функциональной зависимости между связанными узлами. Байесовская сеть описывает совместное распределение вероятностей совокупности случайных переменных.

По имеющемуся набору данных за 2013-2016 гг. (май-сентябрь), используя сглаженные часовые наблюдения, было выполнено обучение дискретной БСД, описывающей ориентированный граф с двумя типами целевых узлов. Первый тип целевых узлов представляет – показатели влажности почвы на глубинах (30, 60 и 120 см), второй тип целевых узлов – индикатор доступности почвенной влаги (pF) по тем же глубинам. В качестве факторных узлов выступили узлы, характеризующие климатические условия (данные регистрируемые метеостанцией), месяц вегетации (май-сентябрь) и год проведения эксперимента, который учитывает возделываемую культуру на экспериментальном участке.

Дискретизация непрерывных переменных для климатических данных выполнена методом равных интервалов, для каждого из узлов определено оптимальное количество категорий. Для оценки статистической значимости связи между дискретными переменными используется критерий Хи-квадрат. Обучение структуры сети выполнено в среде Hugin Expert, где посредством попарных сравнений факторов выявились наиболее устойчивые и статистически значимые связи между узлами сети. Выявлено, что связи всасывающего давления на глубине 30 см с влажностью почвы на глубине 30 см, температурой воздуха, давлением, влажностью воздуха и периодом вегетации характеризуются наибольшей статистической значимостью.

Обучение таблицы условных вероятностей сети выполнено в среде Netica на основе EM-алгоритма. Результаты обучения демонстрируют высокую точность обучения. Так, ошибка обучения сети, моделирующей водный режим почв под технологией No-Till, составляет по узлам первой целевой группы 5%, по узлам pF – 7%; для сети, моделирующей водный режим почв под Deep Tillage – 3% и 2,5%, соответственно. Детально результаты оценки качества классификации наблюдений на основе применяемой сети для узлов влажности почвы на глубине 30 см и всасывающего давления на этой же глубине приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оценки качества классификации для целевых узлов «Влажность почвы на глубине 30 см» и «Всасывающее давление почвы (pF) на глубине 30 см»

Целевой узел	Эксперимент	Общее количество классифицируемых наблюдений		Ошибочно классифицировано, наблюдений (%)
		Верно	Неверно	
Объемная влажность почвы на глубине 30 см (%)	No-Till	2344	72	3,0
	Deep Tillage	1119	29	2,5
Всасывающее давление почвы на глубине 30 см (pF)	No-Till	2237	179	7,4
	Deep Tillage	1096	52	4,5

Анализ чувствительности целевых узлов под различными технологиями обработки почвы к изменению погодных условий показал, что технология глубокого рыхления более чувствительна к вариации осадков и температуры воздуха. Почвы, обработка которых осуществляется по технологии No-Till, имеют более высокую влажность на всех глубинах, особенно в первые месяцы вегетации, что характеризуется как некоторое преимущество данной технологии, выраженное в повышении способности сохранения почвенной влаги. Однако, доступность почвенной влаги под No-Till в целом ниже, чем при технологии глубокого рыхления в период конец июля и август. Детально результаты оценки чувствительности целевых узлов, описывающих объемную влажность и всасывающее давление почвы на глубине 30 см, приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Оценки чувствительности целевых узлов, описывающих объемную влажность почвы (%) и всасывающее давление на глубине 30 см (pF) к изменению климатических факторов и параметров водного режима почвы

Показатель	Влажность на глубине (%)		Всасывающее давление (pF)	
	30 см		30 см	
	Deep Tillage	No-Till	Deep Tillage	No-Till
Период (Год)	2,1%	12,6%	0,172%	0,149%
Месяц вегетации (Май-Сентябрь)	38,4%	11,3%	0,15%	5,43%
Температура (°C)	0,526%	0,578%	0,191%	0,105%
Влажность воздуха (%)	0,023%	0,061%	0,014%	0,032%
Давление (Па)	0,060%	0,054%	0,119%	0,055%
Солнечная радиация (Вт/м <sup>2</sup> )	0,019%	0,008%	0,074%	0,046%
Сумма осадков (мм в сутки)	4,58%	2,16%	0,284%	0,090%

Всасывающее давление почвы на глубине 30 см (pF)	10,30%	4,46%	-	-
Всасывающее давление почвы на глубине 60 см (pF)	25,3%	7,3%	15,6%	7,7%
Всасывающее давление почвы на глубине 120 см (pF)	26,3%	8,2%	7,8%	1,7%
Объемная влажность почвы на глубине 30 см (%)	-	-	0,11%	1,37%
Объемная влажность почвы на глубине 60 см (%)	89,4%	76,9%	0,02%	0,21%
Объемная влажность почвы на глубине 120 см (%)	79,4%	71,4%	0,01%	0,17%

### Библиографический список

1. Терехов С.А. Лекции по нейроинформатике. – М.: МИФИ, 2003. – С. 149–184.
2. Ганжара Н.Ф. Почвоведение. – М.: Изд-во Агроконсалт, 2001. – 392 с.
3. Ревякин В.С., Харламова Н.Ф. Особенности засушливости климата на территории Алтайского края // Кулундинская степь: прошлое, настоящее, будущее: Мат. научно-практ. конф. / Под ред. Е.Г. Парамонова. – Изд-во Алт. ун-та, 2003. – С. 305–313.