

Гржебиш В. – профессор-менеджер, Познаньский университет естественных наук (г. Познань, Польша).

Авторы признательны региональному директору Международного института питания растений по Югу и Востоку России В.В. Носову за помощь в подготовке статьи.

## Литература

Raun, W.R. and G.V. Johnson. 1999. *Agron. J.* 91: 357-363.

Emam, Y. and A.R. Borjian. 2000. *J. Agr. Sci. Tech.* 2: 263-270.

Zecevic, V., Dokic, D., Knezevic, D. and D. Micanovic. 2004. *Kragujevac J. Sci.* 26: 85-90.

El-Abady, M.I., Seadh, S.E., El-Ward, A., Ibrahim, A. and A.M. El-

Amam. 2009. *Int. J. Sustain. Crop Prod.* 4 (4): 33-39.

Khan, P., Memon, M.Y., Imtiaz, M. and M. Aslam. 2009. *Pak. J. Bot.* 41 (3): 1197-1204.

Zheng, Y., Xu, X., Simmons, M., Zhang, C., Gao, F. and Z. Li. 2010. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173: 444-452.

Powlson, D.S., Poulton, P.R., Penny, A., and M.V. Hewitt. 1987. *J. Sci. Food Agric.* 41: 195-203.

Barraclough, P.B., and J. Haynes. 1996. *Fert. Res.* 44: 217-223.

Meier, U. 2001. *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. BBCH Monograph. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry.*

Das, S. and A.K. Sarkar. 1981. *Indian Agriculturist* 25: 267-273.

AOAC. 1990. *Official Methods of Analysis.* Washington, DC: AOAC.

Richards, L.A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils.* USDA Handbook No. 60. Washington, DC: USDA.

Jackson, M.L. 1973. *Soil Chemical Analysis.* New Delhi: Prentice Hall of India Pvt. Ltd.

# Оптимизация азотного питания пшеницы на почвах с неблагоприятными физико-химическими свойствами подпахотного горизонта

Дж.Ф. Ангус, Ч.Н. Уолкер, Ю.Ф. Педлер и Р.Н. Нортон

При внесении азотных удобрений под пшеницу на почвах с сильной засоленностью, высокой щелочностью и/или токсичным для растений содержанием водорастворимого бора в подпахотном горизонте часто наблюдается низкая эффективность использования азота растениями и низкая экономическая отдача от применения азотных удобрений. При значительной пестроте почвенного покрова данные почвенные зоны могут быть выявлены с помощью электромагнитного индукционного зондирования. Азотные удобрения можно применять дифференцированно с учетом выявленных зон с разной выраженностью неблагоприятных свойств подпахотного горизонта.

В «зерновом поясе» Австралии, расположенном на Юго-Востоке страны, широко распространены почвы, подпахотный горизонт которых характеризуется сильной засоленностью, а также высокой солонцеватостью и, соответственно, щелочностью. Протекающие в данных почвах химические процессы ведут к переуплотнению подпахотного горизонта, накоплению токсичных количеств водорастворимого бора, а также снижению доступности почвенной влаги из-за накопления солей. Обследование ряда полей показало, что зачастую может проявляться сразу несколько из вышеуказанных лимитирующих факторов (табл. 1). В результате этого ограничивается рост корневой системы, что не позволяет растениям поглощать влагу и элементы питания из подпахотного горизонта почвы. При этом отзывчивость растений на применение азотных удобрений на таких почвах недостоверна даже в годы с достаточным количеством осадков, что ведет к низкой эффективности использования азота и низкой экономической отдаче от применения азотных удобрений.

На рис. 1 показан регион в северо-западной части штата Виктория, где в 2000-2004 гг. была проведена серия полевых опытов. В данном районе количество осадков за вегетационный сезон варьирует от 104

до 596 мм, составляя в среднем 392 мм. В каждом опыте мы оценивали систему применения азотных удобрений под пшеницу. Согласно рабочей гипотезе, отзывчивость растений на азотные удобрения можно улучшить, если доступный растениям азот будет сосредоточен в пахотном горизонте, откуда корневая система сможет его поглощать. Однако

**Таблица 1.** Результаты обследования 36-ти полей в южной части района Малли и в районе Виммера: содержание водорастворимого бора, степень солонцеватости (доля обменного Na от ЕКО) и степень засоления (удельная электропроводность – ЕС при соотношении почва:H<sub>2</sub>O = 1:5) для слоя почвы 0-60 см.

Лимитирующие факторы (в скобках даны критические значения показателей)	Площадь, %
Бор (> 8 мг/кг почвы)	67
Солонцеватость (доля обменного Na > 15%)	67
Засоление (ЕС > 2 мСм/см)	67
Бор (> 8 мг/кг почвы) и солонцеватость (доля обменного Na > 15%)	56
Бор (> 8 мг/кг почвы) и засоление (ЕС > 2 мСм/см)	47
Солонцеватость (доля обменного Na > 15%) и засоление (ЕС > 2 мСм/см)	36



**Рис. 1.** Регион в северо-западной части штата Виктория (Австралия), где проводились полевые опыты с азотными удобрениями, описываемые в статье.

Карта адаптирована из: Совет по прогнозированию развития мирового сельского хозяйства и Зарубежная сельскохозяйственная служба Министерства сельского хозяйства США.

содержание доступных форм азота не должно быть слишком высоким, чтобы не допустить чрезмерного роста вегетативной массы и быстрого истощения ограниченных запасов продуктивной влаги в почве. В опытах изучались сроки и способы внесения азотных удобрений, включая дробное внесение, глубокое ленточное внесение при посеве (ниже семян), ленточное внесение в середину междурядий при посеве, допосевное ленточное внесение и внесение взброс перед посевом. В течение 5-ти лет ежегодно проводилось 14 полевых опытов. Внесение азота в дозе 40 кг N/га до посева не оказывало статистически значимого влияния на урожайность зерна в опытах, проводившихся на почвах с неблагоприятными физико-химическими свойствами подпахотного горизонта. Однако дробное внесение азота и припосевное ленточное внесение способствовали получению достоверной прибавки урожайности (табл. 2). В тех же случаях, когда физико-химические свойства подпахотного горизонта не лимитировали урожайность, достоверных различий между способами внесения азотных удобрений не наблюдалось.

Таким образом, полученные данные подтверждают гипотезу о том, что снижение потерь азота из пахотного горизонта за счет дробного или припосевного ленточного внесения азотных удобрений повышает урожайность зерна и эффективность использования азота растениями. При возделывании пшеницы на почвах с неблагоприятными физико-химическими свойствами подпахотного горизонта фермеры могут использовать два вышеуказанных способа внесения азотных удобрений. Однако при этом возникает проблема, связанная с сильным пространственным варьированием физико-химических свойств подпахотного горизонта почв. При внесении единой дозы азотных удобрений для всего поля в зонах с неблагоприятными свойствами подпахотного горизонта может быть внесен избыток азота, а в зонах, где физико-химические свойства подпахотного горизонта не лимитируют урожайность, – недостаточное количество азота. Поэтому для дифференцированного применения азотных удобрений важно разработать простой и недорогой метод, позволяющий выявлять вышеуказанные зоны на полях.

В 2001 г. к северу от г. Бирчип было картировано поле по величине удельной электропроводности (ЕС) с использованием прибора ЕМ38. Картирование проводилось в начале марта для получения наиболее сильного сигнала в тех случаях, когда предшествующей культурой было использовано наименьшее количество влаги из подпахотного го-



**Общий вид поля в районе г. Варракнабеала:** делянки с разными сроками и способами внесения азотных удобрений.

**Таблица 2.** Отзывчивость пшеницы на применение азотных удобрений (40 кг N/га) при наличии неблагоприятных физико-химических свойств у подпахотного горизонта (10 районов) и при их отсутствии (4 района) в полевых опытах, проведенных в 1999-2004 гг. в северо-западной части штата Виктория.

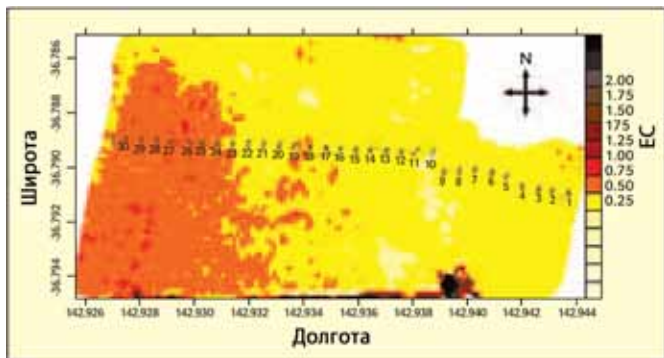
Опыты	----- Урожайность зерна, т/га -----			
	Без азота	Допосевное ленточное внесение <sup>1</sup>	Припосевное ленточное внесение в середину междурядий <sup>2</sup>	Дробное внесение <sup>3</sup>
Все	2.94 a	3.11 ab	3.52 c	3.30 b
При наличии неблагоприятных свойств у подпахотного горизонта	2.80 a	2.92 a	3.45 b	3.17 ab
При отсутствии неблагоприятных свойств у подпахотного горизонта	3.27 a	3.58 b	3.64 b	3.62 b

<sup>1</sup> Допосевное ленточное внесение проводилось примерно за 2 недели до посева (ширина междурядий – 22 см).

<sup>2</sup> Припосевное ленточное внесение в середину каждого 2-го междурядья (ширина междурядий – 44 см).

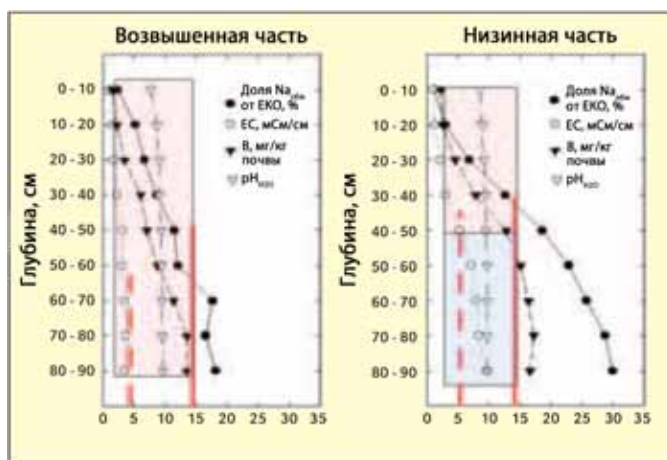
<sup>3</sup> Дробное внесение: припосевное ленточное внесение в середину каждого 2-го междурядья (50%) + подкормка взброс в фазу выхода в трубку (50%).

При сопоставлении урожайности по вариантам опытов разные буквы указывают на достоверные различия ( $p < 0.05$ ).



**Рис. 2.** Картограмма удельной электропроводности (мСм/см), измеренной с помощью прибора EM38 в режиме горизонтального диполя в марте. Показано 30 парных участков – внутри и вне полосы с внесением карбамида (ширина полосы – 10 м, ленточный способ внесения, срок внесения – май).

ризонта. Плохое использование влаги из подпахотного горизонта растениями – хороший индикатор неблагоприятных физико-химических свойств данного горизонта. Это обычно связано с засолением и осолонцеванием, что дает высокие показания ЕС во влажной почве. Токсичное для растений содержание водорастворимого бора или переуплотнение почвы – это также возможные неблагоприятные свойства подпахотного горизонта, однако они не выявляются при измерении величины ЕС. Следовательно, наличие неиспользованной растениями влаги в подпахотном горизонте почвы после уборки может служить индикатором его неблагоприятных свойств, но не позволяет установить возможные причины. Согласно картограмме, созданной с помощью прибора EM38, высокие значения ЕС были получены примерно для одной трети поля. Это простирающаяся на запад низинная часть с гильгайнскими комплексами, для которой характерно сильное пространственное варьирование физико-химических свойств почвы (рис. 2). Гильгаи – бугорково-западинный микрорельеф, характерный для глинистых почв, в которых протекают процессы набухания и усадки при сменяющихся циклах увлаж-

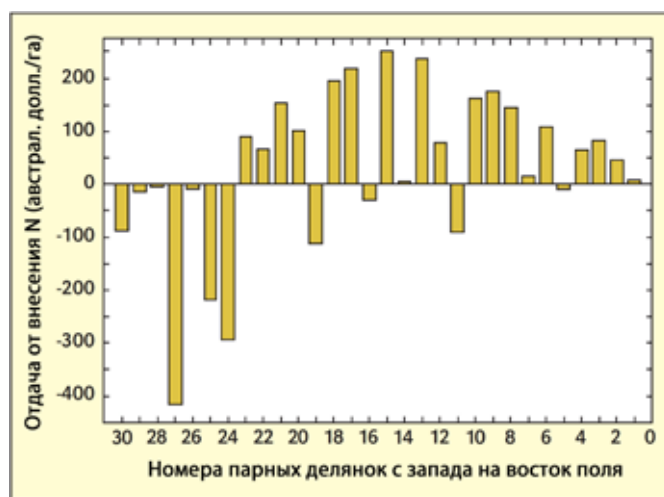


**Рис. 3.** Физико-химические свойства двух почвенных профилей: глубина проникновения корневой системы на почвах возвышенных элементов рельефа – почти 1 м, а на почвах в низинной части рельефа – около 0.5 м (район г. Бирчип, 2001 г.).

Дается ЕС фильтратов из насыщенных водой почвенных паст и содержание водорастворимого бора.

нения-высыхания. Почвы возвышенных элементов рельефа имеют более высокое содержание песчаной фракции. Для данных почв характерны более низкие значения ЕС, и, предположительно, они имеют меньше ограничений для развития корневой системы в подпахотном горизонте (рис. 3).

В мае 2001 г. полосой вдоль поля ленточным способом был внесен карбамид (30 кг N/га). Ширина полосы составила 10 м. Пшеница (сорт Н45) была посеяна в середине июня. В начале августа в 30-ти точках, расположенных вдоль удобренной азотом полосы (с интервалом 50 м), был проведен отбор почвенных образцов с помощью бура. Почвенные образцы отбирались также и с примыкающих участков поля, где карбамид не вносился. Уборка проводилась в ноябре, и учет урожайности был проведен с делянок (10 м × 2 м) как в пределах удобренной азотом полосы, так и вне ее. Это позволило сопоставить данные по урожайности зерна и содержанию белка в зерне с физико-химическими свойствами почвы, включая величину ЕС, картированную с помощью прибора EM38 (рис. 2), в вариантах с внесением и без внесения карбамида. Влияние азотного удобрения на урожайность и содержание белка в зерне определялось рельефом поля и физико-химическими свойствами почвы, включая величину ЕС. Для каждой делянки была определена стоимость зерна с учетом содержания белка в зерне, а также содержания сорной примеси, и, исходя из полученной урожайности зерна, рассчитана прибыль (австрал. долл./га). Разница между прибылью для делянок с внесением и без внесения карбамида (полоса с внесением карбамида и парно расположенные делянки, где карбамид не вносился), показана на рис. 4. Данный показатель хорошо согласуется со значениями ЕС для соответствующих частей поля, как следует из картограммы, составленной с помощью прибора EM38.



**Рис. 4.** Экономическая отдача от применения карбамида (австрал. долл./га): разница между прибылью для делянок с внесением 30 и 0 кг N/га (30 делянок внутри полосы с внесением карбамида и 30 парно расположенных делянок, где карбамид не вносился). Прибыль рассчитывалась исходя из урожайности зерна и его качества – содержания белка и содержания сорной примеси с использованием «Золотой таблицы премий за качество» Австралийского совета по зерну (AWB 'Golden Returns' matrix).



Развитие **корневой системы** пшеницы при наличии неблагоприятных физико-химических свойств у подпахотного горизонта (почвенный разрез в районе г. Варракнабеаль).

ответственно, прибыли в результате образования большой вегетативной массы в ущерб формированию зерна, а также уменьшения размера зерен.

Средняя урожайность на данном поле при внесении карбамида составила 3.1 т/га, а среднее содержание белка в зерне – 10.5%. На картограмме, показанной на **рис. 2**, можно провести линию между 23-й и 24-й парами делянок и выделить 2 зоны. Если бы в зоне с неблагоприятными физико-химическими почвенными свойствами не вносился карбамид, средняя урожайность на данном поле составила бы 3.3 т/га, а среднее содержание белка в зерне – 11.0%. При таком дифференцированном внесении азота прибыль была бы выше на 50 австрал. долл./га частично за счет снижения затрат на азотные удобрения, а также за счет повышения качества зерна в зонах с неблагоприятными свойствами подпахотного горизонта. Таким образом, среднюю урожайность зерна на данном поле, а также содержание белка в зерне можно повысить при практически тех же или даже более низких затратах на азотные удобрения.

Картирование величины ЕС, а также изучение отзывчивости на азотные удобрения по вышеуказанной схеме (полоса с внесением карбамида), было дополнительно проведено для 7-ми полей в течение двух сезонов. Согласно классификации почв Австралии ([http://www.clw.csiro.au/aclep/asc\\_re\\_on\\_line/soilhome.htm](http://www.clw.csiro.au/aclep/asc_re_on_line/soilhome.htm)), типичный почвенный покров исследованных полей – это комплексы вертосолей (Vertosols) [«эпикарбонатная» «эндогипернатриевая» самомульчирующаяся серая вертосоль], калькарасолей (Calcarasols) [«эпигипернатриевая» структурированная «гиперкальциковая» калькарасоль] и содосолей (Sodosols) [«вертикальные» и кальциковые красные содосоли]. Учет урожайности проводился близко к точкам отбора почвенных образцов. Сопоставление урожайности внутри и вне полосы с внесением кар-

Допосевное ленточное внесение карбамида было прибыльным или же безубыточным примерно для двух третей поля. Согласно картограмме, составленной в марте, здесь были получены значения  $ЕС \leq 0.25$  мСм/см. Для одной трети поля были характерны значения  $ЕС > 0.25$  мСм/см, что соответствует сильносолонцеватым и сильнозасоленным почвам гильгаев. Внесение карбамида приводило здесь к сильному снижению урожайности и, со-

бамида позволило оценить отзывчивость пшеницы на азотные удобрения.

Согласно полученным результатам, в 2001 г. наблюдалась относительно высокая урожайность и высокая отзывчивость пшеницы на азотное удобрение, а в засушливом 2002 г. – низкая урожайность и низкая отзывчивость на азотное удобрение. Снижение урожайности при внесении азота в зонах с сильнозасоленными почвами было вызвано образованием большой вегетативной массы в ущерб формированию зерна, поскольку запасы продуктивной влаги в почве были недостаточными для налива зерна у наиболее раскустившихся растений. Внесение азотных удобрений в зонах со слабозасоленными почвами способствовало получению высокой прибавки урожайности на пяти из восьми полей. При этом наблюдалось снижение отзывчивости растений на азот с ростом степени засоления почв. Полученные результаты были обобщены в виде уравнения, которое позволяет рассчитать минимально возможную прибавку урожайности при внесении азота в зависимости от показаний прибора ЕМ38.

Данное уравнение было использовано для прогнозирования зон в пределах обследованных полей, где внесение азота может быть экономически выгодным. При этом подразумевается 100-процентная доходность от вложенных в азотные удобрения средств, то есть стоимость прибавки урожая должна в два раза превышать стоимость внесенного удобрения. На одном из полей вероятность такой прибыльности при внесении единой для всего поля дозы азота составила 21%. Однако в случае внесения азотных удобрений только в зонах, где величина ЕС составляет менее 0.75 мСм/см, вероятность получения вышеуказанной прибыли возрастала до 65% (**табл. 2**). Дополнительное использование такого показателя, как содержание белка в зерне может помочь в решении вопроса о необходимости внесения азота в зонах, где низкие прибавки урожайности зерна от азотных удобрений указывают на экономическую нецелесообразность их применения.

Кроме того, отказ от использования азотных удобрений в зонах с благоприятными физико-химическими свойствами почвы может быть оправдан в тех случаях, когда в результате высокой урожайности предшествующей культуры запасы продуктивной влаги в почве сильно истощаются, и в дальнейшем выпадает



**Подпахотный горизонт** с неблагоприятными физико-химическими свойствами (почвенный разрез в районе г. Варракнабеаль).



**Соавтор статьи – Чарли Уолкер**, обсуждающий систему земледелия на почвах с неблагоприятными физико-химическими свойствами подпахотного горизонта.

недостаточное количество осадков для их восполнения.

Стоимость однократного обследования с помощью прибора EM38 составляет порядка 5 австрал. долл./га. Исходя из данных, полученных для 8-ми изученных полей, ежегодная прибыль от дифференцированного внесения азотных удобрений могла бы составить около 5 австрал. долл./га. Предполагается, что азотные удобрения не используются в зонах с неблагоприятными почвенными свойствами, что составляет 30% от общей площади полей. Для остальной площади полей в данный расчет в качестве примера заложена доза азота, равная 20 кг N/га.

Несмотря на то, что инвестиции, а также временные затраты, связанные с использованием данных технологий точного земледелия, не оправдывают себя из-за низкой прибыльности, получены достаточно обнадеживающие результаты. Они обосновывают внесение азотных удобрений в тех зонах полей, где растения отзываются на азот. При этом оправдано проведение дальнейших исследований по улучшению систем дифференцированного применения азотных удобрений в районах с сильным пространственным варьированием физико-химических свойств подпахотного горизонта.

*Д-р Ангус – почетный исследователь отдела по растениеводству Организации стран Британского содружества по научным и промышленным исследованиям (CSIRO Plant Industry), г. Канберра (Австралия); e-mail: john.angus@csiro.au.*

*Г-н Уолкер – менеджер по техническим вопросам и развитию «Инцитек Пивот Фертилайзерс» (Incitec Pivot Fertilizers).*

*Д-р Педлер – бывший научный сотрудник Мельбурнского университета, г. Хоршам (Австралия).*

*Д-р Нортон – Региональный директор Международ-*

*ного института питания растений по Австралии и Новой Зеландии, г. Хоршам; e-mail: rnorton@ipni.net.*

## Благодарности

Данные исследования финансировались Корпорацией по исследованиям и разработкам в области зерновых культур (CSP340) при поддержке со стороны Организации стран Британского содружества по научным и промышленным исследованиям, Мельбурнского университета, «Инцитек Пивот Фертилайзерс» (Incitec Pivot Fertilizers) и Группы по земледелию района Бирчип.

## Литература

- Angus, J.F., R.M. Norton, J.F. Pedler, C.N. Walker. 2004. Cereal response to N fertiliser in relation to subsoil limitations, *Proceedings for the 4th International Crop Science Congress, 26 September – 1 October 2004, Brisbane, Australia. Australian Society of Agronomy. [http://www.cropscience.org.au/icsc2004/poster/2/5/1/1170\\_angusjf.htm](http://www.cropscience.org.au/icsc2004/poster/2/5/1/1170_angusjf.htm)*
- Armstrong, R.D. (Ed). 2009. *Identifying, understanding and managing hostile subsoils for cropping. The Profitable Soils Group, 92 p.*
- Kaur, S., M. Nicolas, R. Ford, R. Norton, and P. Taylor. 2006. Selection of Brassica rapa genotypes for tolerance to boron toxicity. *Plant Soil*, 285, 115-123.
- Kirkegaard, J.A., J.M. Lilley, G.N. Howe, and J.M. Graham. 2007. Impact of subsoil water use on wheat yield. *Aust. J. Agric. Res.* 58, 303-315.
- Norton, R.M., J. Pedler, C.N. Walker, and J.F. Angus. 2003. Optimum management of N fertiliser for wheat growing on alkaline soils. *Proceedings of the 11th Australian Agronomy Conference, 2-6 Feb. 2003, Geelong, Victoria, Australia. <http://www.regional.org.au/au/asa/2003/p/5/norton.htm#TopOfPage>*
- Nuttall, J.G., R.D. Armstrong, D.J. Connor. 2005. Early growth of wheat (*Triticum aestivum* cv. Frame, BT Schomburgk, and Schomburgk) is more sensitive to salinity than boron at levels encountered in alkaline soils of south-eastern Australia. *Aust. J. Exp. Agric.* 46, 1507-1514.
- O'Leary, G., J. Peters, and D. Roget. 2006. A new standard for electromagnetic induction mapping of soils for the grains industry. *Proceedings of the 13th Australian Agronomy Conference, 10-14 September 2006, Perth, Western Australia. Australian Society of Agronomy. [http://www.regional.org.au/au/asa/2006/poster/soil/4586\\_oleary.htm](http://www.regional.org.au/au/asa/2006/poster/soil/4586_oleary.htm)*
- Pedler, J., M. Kentish, C. Walker, R. Norton, J. Ferrier, and J. Angus. 2003. Determining zones for yield response to N fertilizer in a paddock with subsoil limitations, using electromagnetic induction techniques. *Proceeding of the 11th Australian Agronomy Conference, 2-6 Feb 2003, Geelong, Victoria. Australian Society of Agronomy. <http://www.regional.org.au/au/asa/2003/c/15/pedler.htm#TopOfPage>*

Перевод с английского и адаптация: В.В. Носов.