Засолённые почвы Венгрии: прогноз распространения на основе гидрогеологических карт

Тот Т.[1], Пастор Л.[1], Кабош Ш.[2], Кути Л.[3]

[1]Исследовательский институт почвоведения и агрохимии Венгерской академии наук, Будапешт, Венгрия
[2]Университет Эётвёш, Будапешт, Венгрия
[3]Геологический институт Венгрии, Будапешт, Венгрия

Введение

Присутствие повышенных концентраций растворимых солей в почвах приводит к повышению осмотического потенциала и понижению доступности влаги растениям. Преобладание Na и Mg в поглощающем комплексе почв тяжёлого гранулометрического состава замедляет движение почвенных растворов. Накопление солей на территориях, которые потенциально могли бы использоваться в сельском хозяйстве, представляет собой всемирную проблему, охватывая 340 миллионов гектар во всём мире. Хотя большинство исследователей уделяют большее внимание антропогенному засолению орошаемых земель, территории, подверженные естественному засолению, значительно больше, чем засоляется в результате орошения. В некоторых странах эти естественно засолённые участки важны как потенциальные поля или заповедники.

Для рационального использования засолённых земель необходимо использовать карты состояния накопления солей. Благодаря последним достижениям в технологии и концептуальных разработках картографирование ЗСП значительно облегчилось на каждом уровне управленческих решений (Tóth et al., 1998). Из-за сложности процессов почвообразования трудно установить детерминистское соотношение между почвенными свойствами и факторами почвообразования. Однако в пределах ограниченного района существует возможность установить статистическую зависимость между почвенными свойствами и факторами почвообразования. Подобные зависимости полезны при прогнозе пространственного распределения типов почв и почвенных свойств. Если, например, относительная значимость основных факторов образования засолённых почв (ЗСП) оценена количественно, то можно предсказывать с большей вероятностью риски различного землепользования, которые могут привести к засолению или изменению солевого баланса.

Приводя почвенные карты и карты факторов-почвообразователей можно создать пространственную базу данных, содержащую пространственное распределение категорий для их изображения на карте. Для анализа количественных отношений цифровых карт должны использоваться методы, пригодные для анализа категорийных переменных.

Мы описали распределение основных гидрогеологических факторов, связанных с формированием ЗСП на Великой Венгерской равнине на основании опубликованных карт. Как Ф. К. Дайнеко и В. М. Фридланд (Daineko and Fridland, 1972), мы рассчитали статистические ассоциации на основании пересечения почвообразующих факторов. Эти ассоциации были интерпретированы в свете существующих теорий формирования венгерских ЗСП.

Использование существующих карт в качестве предсказателей накопления солей имеет большое значение во всех случаях, когда (1) не существует детальных данных по пространственному распределению засоления и (2) основные факторы и механизмы аккумуляции солей не прояснены.

Ю. К. Вэй и С. Ю. Лиу (Wei and Liu, 1988) попытались предсказать потенциальное засоление на основе следующих факторов: содержание органического вещества в почве, глубина залегания грунтовых вод, концентрация солей в грунтовых водах и переслаивание отложений. Сначала было установлено отношение между концентрацией растворимых солей в почве (зависимая переменная) от различных факторов (независимых переменных). Действие каждого из влияющих факторов было выражено по отношению к стандартному почвенному профилю. Таким образом, значимость отдельных факторов была выражена в виде коэффициентов, и прогноз уровня засоления осуществлялся путём перемножения всех коэффициентов. Полученная величина колебалась от 0 до 1, и её увеличение указывало на возрастающую вероятность засоления.

С. Дж. Тикелл (Tickell, 1997) использовал сходный подход, при котором категории карт засоления грунтовых вод (1:250.000), растительности (1:1.000.000), количества осадков (1:10.000.000), количества влаги (1:250.000) и присутствия латерита (1:2.000.000) были ранжированы от 1 до 10 по отношению к их значению для опасности засоления. Эти карты затем были наложены друг на

друга, ранги опасности результирующих контуров суммированы, и была скомпилирована карта опасности засоления масштаба 1:2.000.000 с четырьмя категориями от очень низкой до высокой опасности засоления.

Р. Г. Эйлерс с соавторами (Eilers et al., 1997) использовал несколько усовершенствованную методику, в которой индекс риска засоления был продуктом ранжирования от 1 до 10 трёх групп факторов, а именно факторов современного состояния (площадь современного засоления), статических и динамических факторов. Определение статических факторов было продуктом ранжирования топографии, поверхностных отложений, геологии и гидрологии. Динамические факторы рассчитывались путём умножения рангов аридности, поверхностного покрытия и типа охраны почв.

Дж. М. Брадд с соавторами (Bradd et al., 1997) использовали метод «веса признака» при составлении карт опасности засоления. Они использовали геологические, почвенные карты, карты землепользования, осадков, форм рельефа, характеристик грунтовых вод и растительности. Карты были заново классифицированы, конвертированы в формат ГИС, и проанализированы каждая в паре с картой встречаемости засоления в сухих областях. Веса, вычисленные для каждой отдельной карты (которые считались взаимно независимыми) были скомбинированы для составления конечного уравнения.

В данном исследовании мы провели одновременную обработку нескольких карт–предсказателей для прогноза аккумуляции солей и анализа значимостей гидрогеологических и геоморфологических факторов. Нашей задачей было проверить недавно разработанные методики обработки пространственно-распределённых данных и статистические методы для прогноза разных уровней аккумуляции солей на основе ранее созданных карт. Поскольку классические статистические методы прогноза, такие как ANOVA и линейная регрессия принимают, что показатели проб стохастически независимы (т. е. что величина ошибки независима от одного наблюдения к другому), что нетипично в случае почвенных свойств, мы предложили альтернативный статистический подход, принимающий во внимание пространственную регионализацию участков. Частично результаты данного исследования были представлены ранее в работах Т. Тота и соавторов (Tóth et al., 2001, 2002).

Материалы и методы

Карта засолённых почв Венгрии была опубликована И. Саболчем (Szabolcs, 1974). Почвенные категории этой карты (Табл. 1) скоррелированы с другими классификационными системами в том же издании на стр. 39-40. Большинство категорий соотносится с таковыми К. Е. Келлога (Kellog, 1934), К. А. МакКлеланда с соавторами (McClelland et al., 1959) и Е. Н. Буи с соавторами (Bui et al., 1998).

Около трети территории Великой Венгерской равнины подвергается содификации, в основном процессам осолонцевания, одна треть представляет собой потенциальные ЗСП и треть не подвержена засолению и содификации. К потенциальным ЗСП были причислены те почвы, которые в настоящее время не подвержены этим процессам в настоящее время, но могут стать существенно засолёнными или насыщенными натрием в результате орошения (Szabolcs, 1974). Территориальное распределение некоторых типов ЗСП очевидно. Почвенные типы 2–6 из Табл. 1 сконцентрированы преимущественно на междуречье Дуная и Тисы, типы 7–10 более типичны для долины р. Тисы. За исключением карбонатных ЗСП (4 и 6), сгруппированных с солончаками, Табл. 1 приводит типы ЗСП в целом по убыванию концентрации солей.

Таблица 1. **Площадь, занимаемая категориями карты «Засолённые почвы Венгрии в пределах Великой Венгерской равнины**

Почва (№ категории на карте)	Площадь		Количество контуров		Средний размер, км^2	Стандартное отклонение
	км^2	%		%		
Содовый солончак (№ 2)	200,9	0,4	17	4,0	11,8	8,7
Содовый солончак–солонец (№ 3)	1135,5	2,5	51	11,9	22,3	56,0
Карбонатный луговый солонец (№ 4)	61,7	0,1	7	1,6	8,8	3,7
Карбонатная солонцовая Луговая почва (№ 6)	462,4	1,0	19	4,4	24,3	26,2
Луговый солонец (№ 7)	3451,7	7,5	71	16,6	48,6	27,4
Луговый остепняющийся солонец (№ 8)	2503,5	5,4	67	15,6	37,4	63,2
Солонцовая луговая почва (№ 9)	1585,5	3,4	57	13,3	27,8	86,0
Чернозёмы и луговые чернозёмы, глубинно-засолённые(№10)	3552,4	7,7	45	10,5	78,9	36,1
Потенциально засолённые почвы (№ 11)	16827,6	36,6	83	19,3	202,7	63,2
Незасолённые почвы (№ 12)	16185,9	35,2	12	2,8	1348,8	2744,7
ВСЕГО:	45967,1	100,0	429	100,0		

Методология гидрогеологического картографирования была сформулирована А. Ронаи (Rónai, 1975). Между 1964 и 1985 годами на Равнине было заложено 12422 неглубоких скважины. Глубина бурения была 10 м или до первого твёрдого или гравийного слоя. Почвенные и подпочвенные образцы отбирались из каждого стратиграфически выделяющегося слоя. Глубина уровня грунтовых вод определялась с точностью до 0,5 м. Абсолютные высоты скважин считывались с топографической карты масштаба 1:25.000. На начальном этапе катионы в грунтовых водах определялись комплексонометрически и на пламенном фотометре, а затем с помощью атомно-адсорбционной спектрометрии и спектрофотометрии в пучке связанной плазмы. Анионы титровались, за исключением сульфатов, которые определялись гравиметрически. Распределение частиц по размерам в образцах почв и грунтов определялось просеиванием для частиц более 0,06 мм и седиментацией с последующим отбором пипеткой для более мелких частиц (Methodological Publications, 1973).

Карта «Классы по гранулометрическому составу формаций, близких к поверхности» показывает стратификацию почв и подстилающих материалов в 10-метровых скважинах. Индексы в Табл. 2 показывают последовательности слоёв мощностью 2 м, где G означает гравий (>2 мм), S – песок (2-0,06 мм), I – суглинок (0,06-0,002 мм), а C – глину, (<0,002 мм). Например, SCGGG для выдела 27 указывает, что данная категория содержит песок с поверхности до глубины 2 м, ниже 2 м идёт глина, а ниже глины до 10 м идут гравийные отложения.

В легенде к карте «Ионный состав грунтовых вод» в тех случаях, когда один катион или анион составлял более 50% катионного или анионного состава вод, соответственно, только этот катион или анион упоминается. Если два аниона или катиона составляли 25-50% от общего эквивалента концентрации анионов или катионов, соответственно, но первый из упомянутых ионов имел более высокую концентрацию, упоминались два иона. Если три аниона или катиона составляли 25-50% от общей эквивалентной концентрации анионов или катионов, соответственно, и преобладающим ионом был бикарбонат ион или ион кальция, упоминались три иона. В таблице 2 используются химические символы элементов, за исключением bi=бикарбонат ион и su=сульфат ион.

Таблица 2. **Кросс-таблица карты ЗСП с гидрогеологическими картами: глубина залегания грунтовых вод, классы по гранулометрическому составу и абсолютный уровень грунтовых вод**

Категории карты ЗСП	Глубина залегания грунтовых вод (м)					Классы по гранулометрическому составу поверхностных отложений (последовательности и обозначения на карте)																	Абсолютный уровень грунтовых вод (м)												
	<1	1-2	2-4	4-8	>8	SSSSS(21)	SSCCCC(22)	SCCCC(23)	SISSI(24)	SSGGG(25)	SCSCC(26)	SCGGG(27)	IIII(31)	ISSSS(32)	ISSSS(33)	ISIIS(34)	ICCCI(36)	CCCCC(41)	CCSSS(42)	CSSS(43)	CICII(44)	CCGGG(45)	CSCSS(46)	<80	80-85	85-90	90-95	95-100	100-105	105-110	110-115	115-120	120-130	130-140	140-150	150-160	>160
№ 2 Содовый солончак	X	x	x	.		X	X		X				X	.				.			X	X			.	x	X	X	x	x	x	.	X	X			
№ 3 Содовый солончак-солонец	X	X	x	.	.	x	x	x	.	x		x	.	.	X	x		.	x	.	X	X	x	x	x	x	X	.	.	.		x	.	.	.	x	
№ 4 Карбонатный луговый солонец	X		x			X		X	X						X			.						X	.	x	.	.	X	X	x						
№ 6 Карбонатная солонцеватая луговая почва	X	X	x	.		X	X	.	X					x				.	.	x							.	.	X	X	X	X	X	x				
№ 7 Луговый солонец		x	x	x	.	.		.		.	.		.	x	.			x	x	x	.		X	x	x	X	x	.	.	.	.	.	.				
№ 8 Луговый остепняющийся солонец		x	x	x	x	.	.	X			x		.	x	.		X	x	x	X	.		X	X	X	X	.	.	.		.	.	.				
№ 9 Солонцеватая луговая почва		X	x	x	.	.	.	X			.			x	.	.		X	.	X	.		X	x	X	X	x	x	.	.	.						
№ 10 Солончаковатый чернозём и лугово-чернозёмная почва	.	x	x	x	.	.	x	.	.	.	X	x	X	X	x	x	X	x	X	x	X	.	x	.	X	X	x	x	.	.	.	X	.	.			
№ 11 Потенциально засолённые почвы	x	x	x	x	.	x	x	x	x	x	X	.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	.	x	
№ 12 Незасолённые почвы	x	x	x	x	X	x	X	x	X	x	x	x	x	.	x	x		x	x	x	x	x	.	x	.	.	x	x	x	X	X	X	X	X	X	X	X
Сумма для колонки %	1,2	16	61	18	4,2	12	5,8	0,8	5,3	1,2	0,3	0,3	1,7	3,7	2,1	2,4	0,2	45	4,9	6,4	2,8	2,2	2,6	3,7	19	19	15	8,6	5,9	5,8	5,2	4,6	6,3	4,6	2,3	0,5	0,02	

Примечание: внутри клеток X, x или . указывают, является ли процент площади, занимаемой почвенным типом в соответствующей категории, значительно выше, приблизительно равен или существенно ниже по сравнению со средним для колонки (±50%), соответственно.

В последовательностях отложений G, S, I и C означают двухметровые слои гравелистого, песчаного, пылеватого и глинистого состава, соответственно. Последовательность из 5 букв соответствует последовательности отложений, начинающейся со слоя глубиной 0–2 м и заканчивающейся слоем 8–10 м

Таблица 2 (продолжение). **Общая концентрация солей и преобладающие ионы**

Категории карты ЗСП	Общая концентрация солей в грунтовых водах (г/л)				Преобладающие ионы в грунтовых водах (преобладающие ионы и картографические символы)																												
	<0.5	0.5-1	1-5	5-10	>10	Na biClsu(10)	Na Cl(11)	Na su(14)	Na subi(16)	Na bi(17)	Na bisu(19)	NaMg su(24)	NaMg bi(27)	NaMg bisu(29)	NaCa bi(37)	NaCa biCl(38)	Mg su(44)	Mg subi(46)	Mg bi(47)	MgNa su(54)	MgCa subi(66)	MgCa bi(67)	Ca Cl(71)	Ca Clsu(72)	Ca su(74)	Ca subi(76)	Ca bi(77)	Ca bisu(79)	CaNa biClsu(80)	CaNa bi(87)	CaMg bi(97)	CaMgNa su(104)	CaMgNa bi(107)	CaMgNa biCl(108)
№ 2 Содовый солончак	x	x	x							x									X							x							
№ 3 Содовый солончак-солонец	.	x	x	.						X									x		X	x			.		x			.	.		.	
№ 4 Карбонатный луговый солонец		x	x	X				X		x																	x				X			
№ 6 Карбонатная солонцеватая луговая почва	x	x	x							.									X								x				x		x	
№ 7 Луговый солонец	.	x	x	X	X	X		.		X		X	X			X			.	X					.		.			X	.	X	X	x
№ 8 Луговый остепняющийся солонец	.	.	x	X	X	.	x	X		X		X							.	.					.		x			.	.	X	x	
№ 9 Солонцеватая луговая почва		.	x	x	x	x		.		X		X							.						x		x				.	X	X	
№ 10 Солончаковатый чернозём и лугово-чернозёмная почва	.	x	x	X	x	X		X	X	X		X	.						x	X		.					.			x	x		x	
№ 11 Потенциально засолённые почвы	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x	x	X	X	x			x	x		x	X		x		x		X	.	x	x	x	X
№ 12 Незасолённые почвы	X	X	x	.				.		.			x	x			X	X	x			X		X	X	X	X	X		X	x	x	.	x
Сумма для колонки %	1,8	40	55	3,8	0,1	0,4	0,1	2,9	0,1	33	0,1	0,4	0,3	0,1	0,03	0,1	0,1	0,04	5,3	0,1	0,1	2	0,02	0,02	1,1	0,03	49	0,02	0,03	0,5	1,3	0,2	1,3	0,2

Примечание: Преобладающие катионы и хлориды показаны химическими символами, bi означает бикарбонаты, su – сульфаты

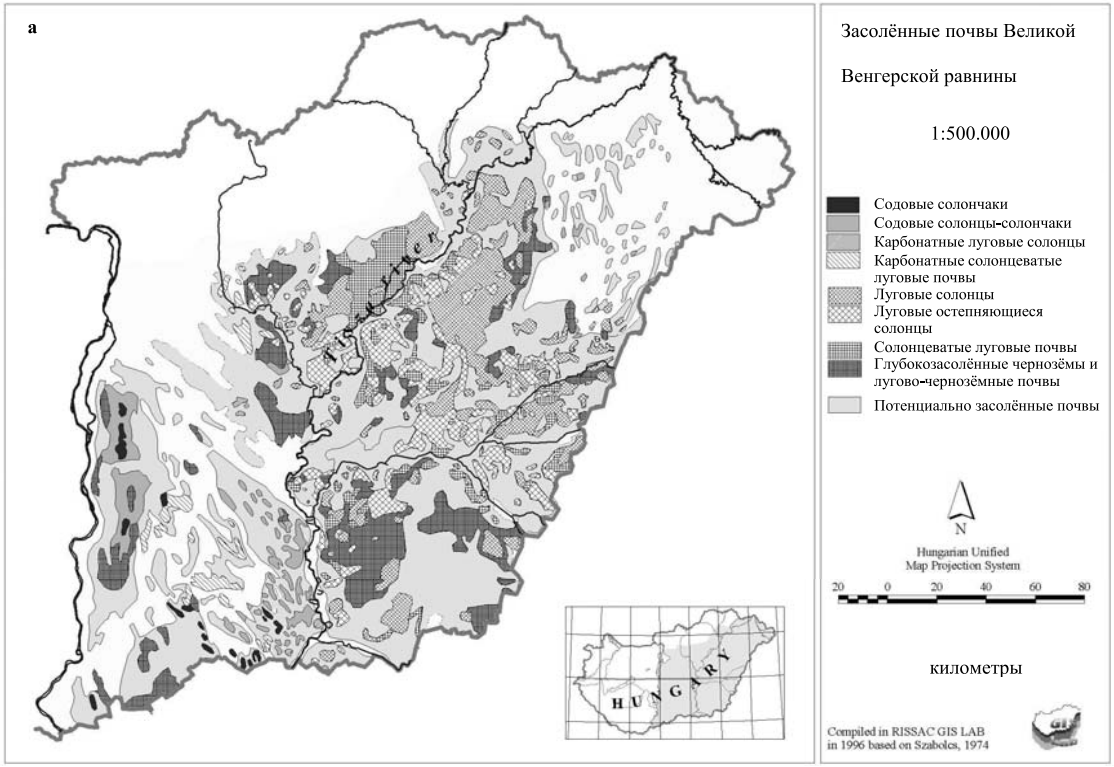

Рис. 1. **Карта засолённых почв и гидрогеологические карты Венгрии: а – карта засолённых почв**

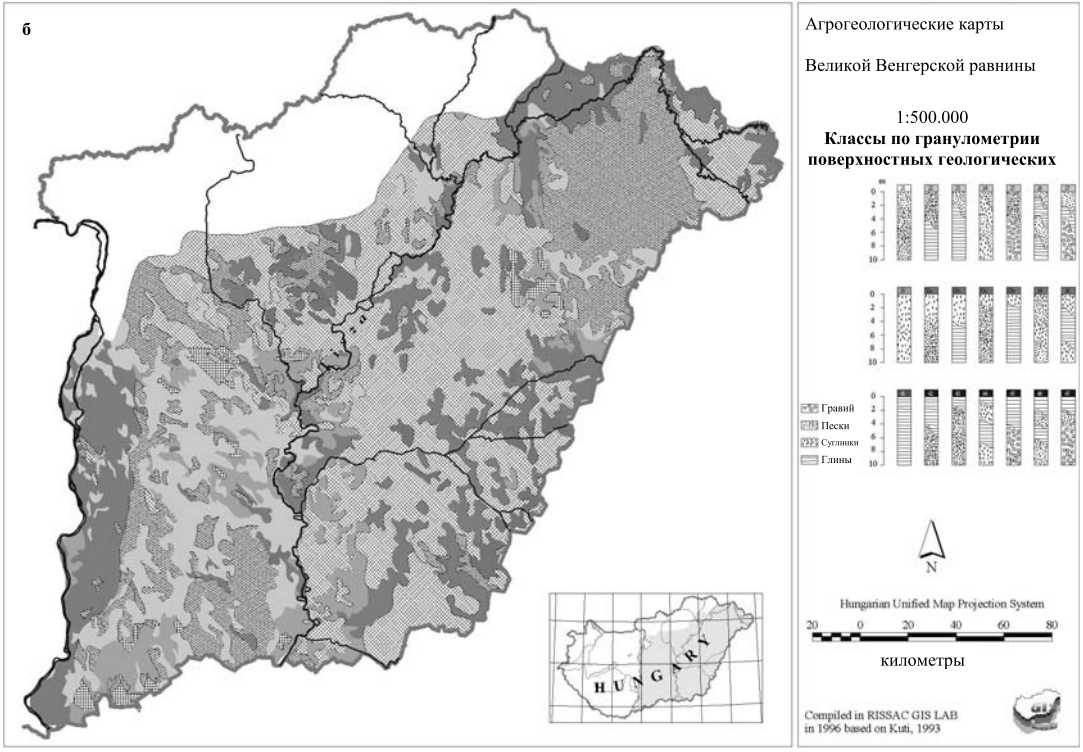

Рис. 1. **Карта засолённых почв и гидрогеологические карты Венгрии: б – карта гранулометрического состава поверхностных отложений**

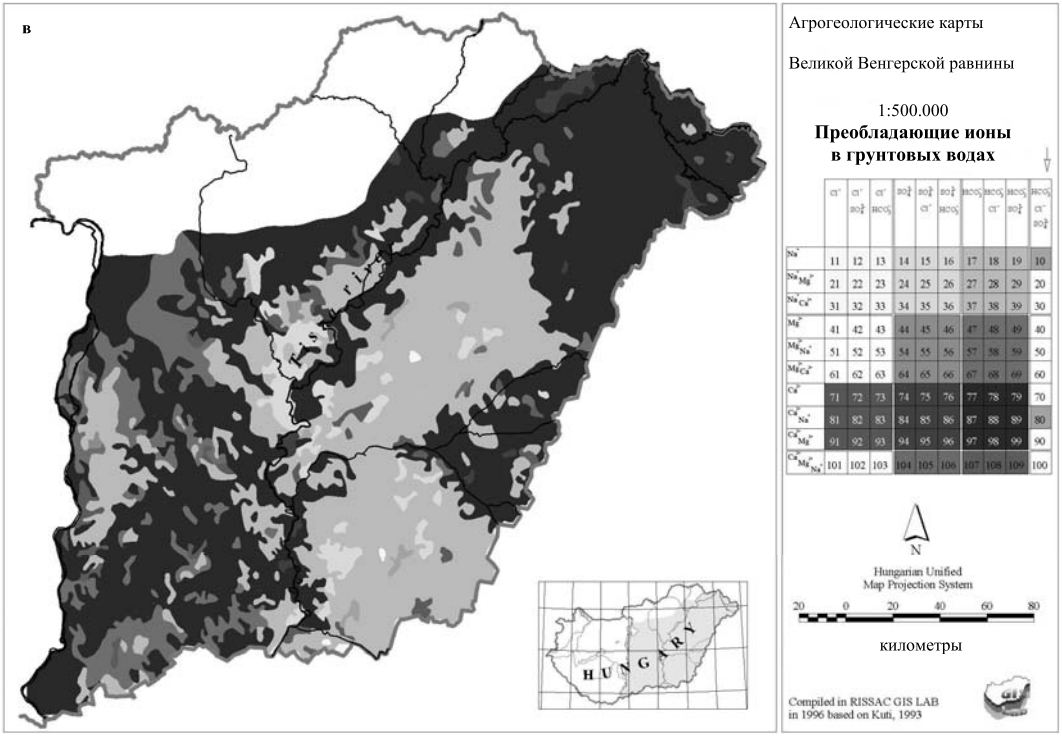

Рис. 1. **Карта засолённых почв и гидрогеологические карты Венгрии: в – состав преобладающих ионов в грунтовых водах**

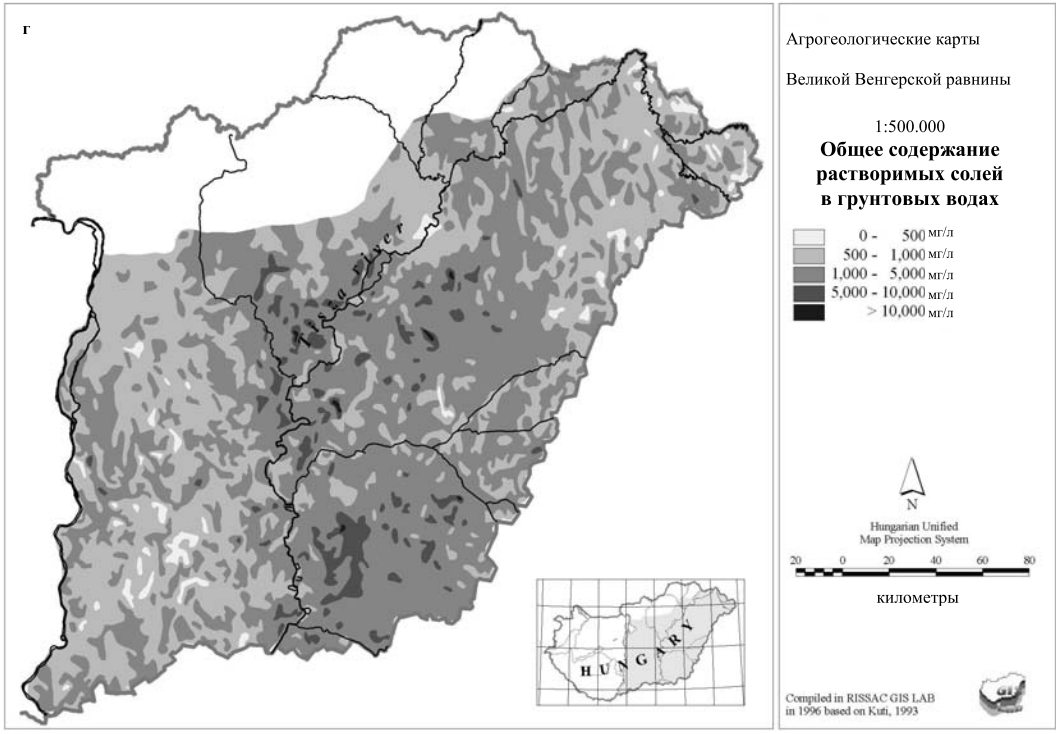

Рис. 1. **Карта засолённых почв и гидрогеологические карты Венгрии: г – общее содержание растворимых солей в грунтовых водах**

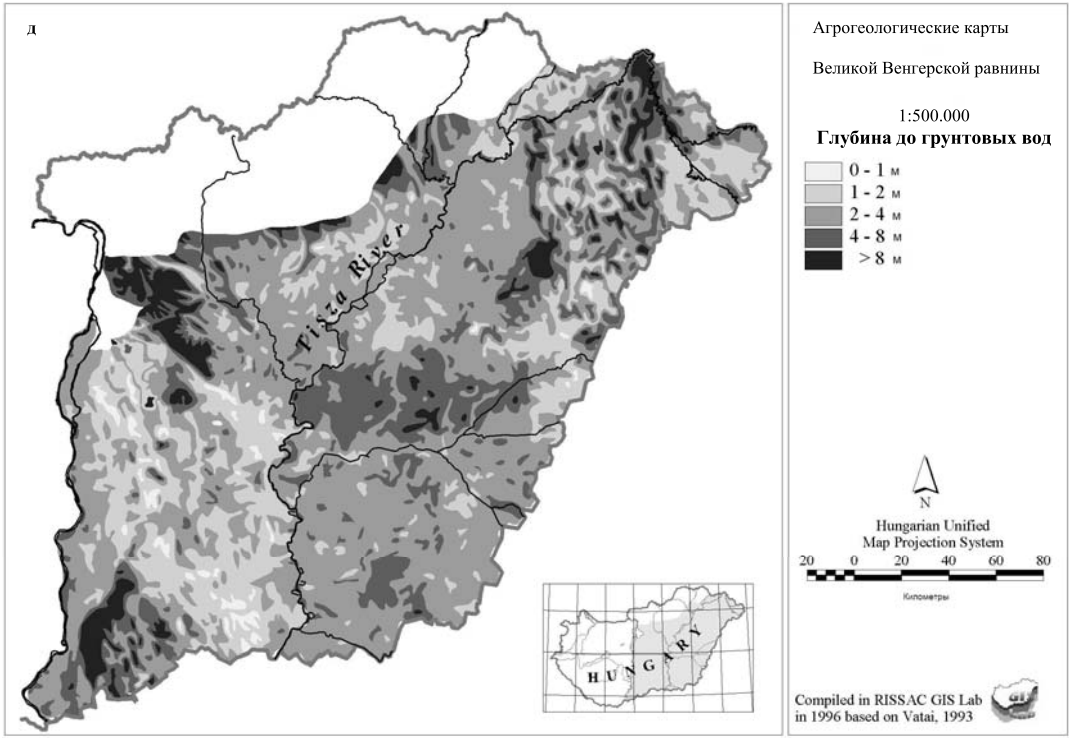

Рис. 1. **Карта засолённых почв и гидрогеологические карты Венгрии: д – относительный уровень грунтовых вод**

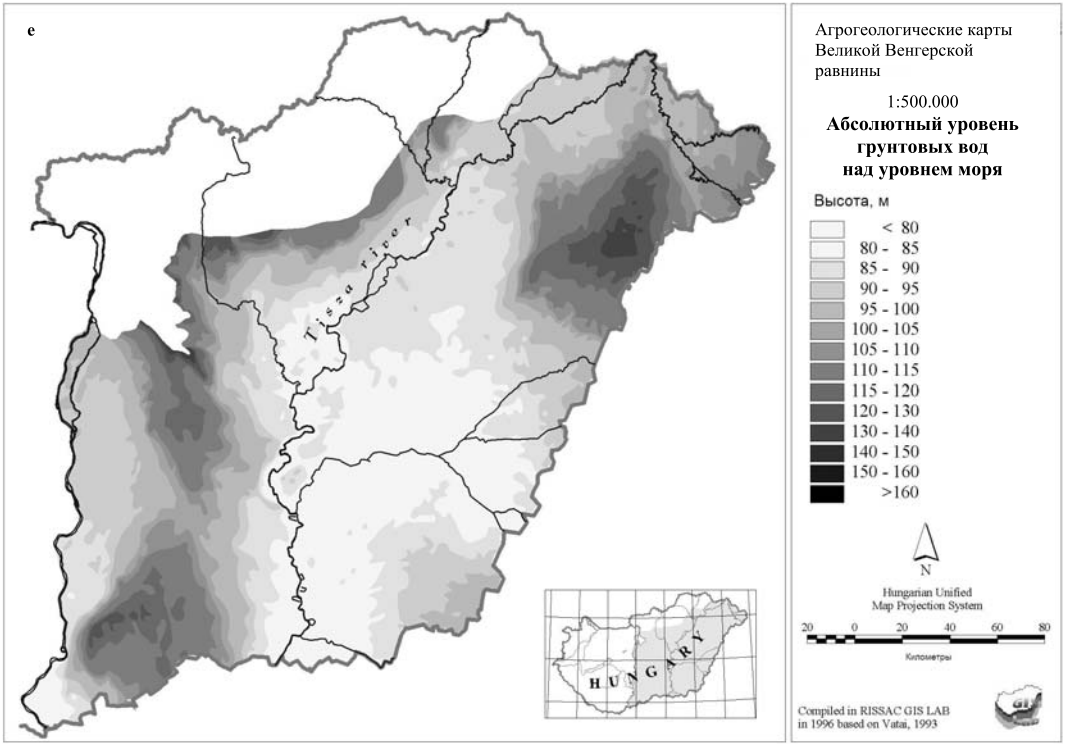

Рис. 1. **Карта засолённых почв и гидрогеологические карты Венгрии: е – абсолютный уровень грунтовых вод**

Обработка картографических данных с помощью ГИС

Тематические данные карт были переведены на цифровые карты. При помощи точек подгонки координат карты были переведены в Венгерскую унифицированную картографическую проекцию. Карты, отражающие разные факторы засоления почв, были наложены друг на друга как разные слои. Тематическое содержание всех карт было объединено, что означает, что каждый из контуров характеризовался шестью параметрами в отличие от исходных карт, каждая из которых отражала лишь один параметр.

В процессе наложения карт появились мелкие и/или удлиненные контуры. Распределение площадей контуров показало явный максимум на 0,14 км^2, и этот размер был принят как минимальный, ниже которого контура удалялись из статистического анализа. С математико-статистической точки зрения, выделы карты представляют собой элементы многомерного пространства факторов. Соответственно, было изучено статистическое поведение 16601 выдела в полученном шестимерном факторном пространстве.

Использованные статистические обработки

Статистические тесты были основаны на кросс-табуляции данных, используя тип ЗСП как зависимую переменную, а гидрогеологические показатели как независимые переменные. Поскольку количество выделов не обязательно отражает площадь, занимаемую каждым типом ЗСП, в данном тесте были использованы весовые значения, привязанные к данным в строке; в качестве весов использовались площади контуров.

Мы попытались вычислить количественную меру статистической связи между типом ЗСП и гидрогеологическими переменными (категориями легенд исходных карт). В теории информации обычным методом измерения ассоциации между двумя номинальными переменными является вычисление асимметричного коэффициента неопределённости, показывающего относительное уменьшение неопределённости одной из переменных, когда другая переменная известна.

Асимметричный коэффициент неопределённости $Uj_{\backslash i}$ Таблицы 4 вычислялся как:

$Uj_{\backslash i} = (Uj + Ui – Uij)/(Uj)$,
где $Uij = -\sum_{i}\sum_{j}(a_{ij}/N)\log(a_{ij}/N)$

$Uj = -\sum_{j}(c_j/N)\log(c_j/N)$

$U_i = -\sum_{i}(r_i/N)\log(r_i/N)$

a_{ij}; i =1, ... , F; j = 1, ... , G – величины частоты в кросс-таблице FxG, индекс j обозначает зависимую переменную, а i обозначает независимую переменную, и где
$ri = \sum_{j} aij$ и $c_j = \sum_{i} aij$, суммы результатов в строке и колонке,

и $N= \sum_{i}\sum_{j} aij$, общий размер выборки, а

значения $Uj_{\backslash i}$ варьируют от 0 до 1. Значение 0 означает, что независимая переменная не даёт информации для прогноза. Значение 1 означает, что независимая переменная полностью определяет прогнозируемую переменную. Преимущество использования коэффициентов неопределённости в их строгой формулировке состоит в том, что они показывают уменьшение энтропии зависимой переменной (как было предложено в теории информации Шанноном (Shannon, 1948)), если независимая переменная известна.

Переменные, полученные из базовых карт, обозначены как: „TFM- gw asl” полученные из «Карты абсолютного уровня грунтовых вод над уровнем моря», „TVM- gw depth” полученные из «Карты глубины грунтовых вод» и „OAT- gw cc” полученные из «Карты общей концентрации растворимых солей в грунтовых водах».

Карта «Таксономическое разделение регионов Венгрии» (Somogyi, 1991) (Рис. 2) была основана на последних геоморфологических и региональных исследованиях. Она представляет иерархическую таксономию регионов. В пределах собственно Великой Венгерской равнины выделяется один макрорегион с 13 мезорегионами, которые подразделяются на 70 микрорегионов. В нашем анализе для количественной оценки мы использовали мезорегионы, однако при представлении результатов мы также использовали и микрорегионы. База данных, созданная на основе базовых карт, была также дополнена этой картой.

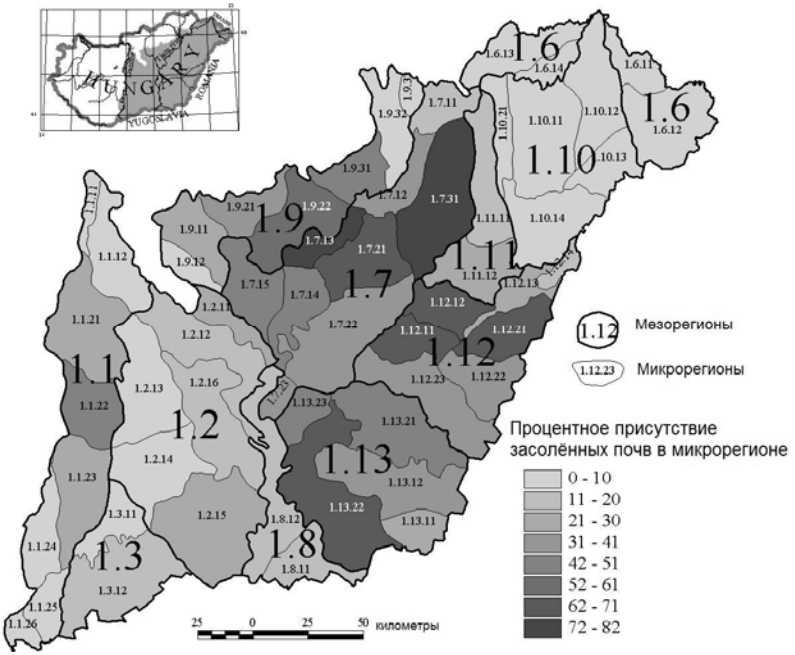

Рис. 2. **Географические мезо- и микрорегионы Великой Венгерской равнины с указанием процента площади, занятой засолёнными почвами**

На основании карты засолённых почв (Szabolcs, 1974) почва расценивалась как засолённая (ЗСП), если принадлежала к первым 8 группам почв, подверженных засолению, и расценивалась как незасолённая (не-ЗСП), если принадлежала к группам «Потенциально засолённых почв» либо «Незасолённых почв».

Количественная оценка категорий HOMALS (анализ гомогенности методом наименьших квадратов) из пакета программ SPSS Categories (SPSS, 1996) преобразует номинальные переменные в численные путём присвоения количественных значений категориям (математическое обоснование см. Gifi, 1990). Проанализированные таблицы (Табл. 3 и 6) включали площадь (км^2), покрытую FAK – типами ионов, и TKT – гранулометрический состав как переменные в строках, и мезорегион как переменную в столбце. Переменные, вычисленные SPSS HOMALS были названы TTKT1,

TTKT2 – количественно оцененные преобладающих типов ионов (изначально TKT) и TFAK1, TFAK2 – количественно оцененные переменные классов по гранулометрическому составу близких к поверхности отложений (изначально FAK).

Таблица 3. **Наиболее распространённые категории гидрогеологических переменных и занимаемая ими площадь** (в %) **в сравнении с общим распространением каждого типа почв**

Почвы/гидрогеология	Последовательность отложений	Ионы в ГВ	Концентрация солей в ГВ, г/л	Глубина ГВ, м	Абсолютная глубина ГВ, м над у.м.
№ 2 Содовый солончак	SSSSS 43%	Ca bi 58%	1-5 60%	2-4 62%	90-95 26%
№ 3 Содовый солончак-солонец	CCGGG 25%	Na bi 60%	1-5 65%	2-4 55%	<80 53%
№ 4 Карбонатный луговый солонец	SISSI 36%	Ca bi 45%	1-5 66%	2-4 83%	<80 26%
№ 6 Карбонатная солонцеватая луговая	SSSSS 52%	Ca bi 70%	0,5-1 57%	2-4 57%	100-105 31%
№ 7 Луговый солонец	CCCCC 66%	Na bi 65%	1-5 70%	2-4 71%	85-90 52%
№ 8 Луговая остепняющаяся почва	CCCCC 67%	Na bi 61%	1-5 75%	2-4 63%	80-85 48%
№ 9 Солонцовая луговая почва	CCCCC 69%	Na bi 52%	1-5 76%	2-4 61%	85-90 40%
№ 10 Глубинно-засолённый чернозём	CCCCC 43%	Na bi 62%	1-5 65%	2-4 74%	80-85 32%
№ 11 Потенциально ЗСП	CCCCC 40%	Ca bi 41%	1-5 61%	2-4 66%	80-85 23%
№ 12 Незасолённые почвы	CCCCC 45%	Ca bi 78%	0,5-1 61%	2-4 50%	120-130 12%

В терминах анализа данных, нашей задачей было предсказать переменную функции (ЗСП) на основании переменных аргумента (TFAK1 – количественно оцененный гранулометрический состав, TTKT1 – количественно оцененный тип ионов, TVM – глубина залегания грунтовых вод, TFM – абсолютный уровень грунтовых вод и OAT – общее засоление грунтовых вод). Статистическая обработка проводилась как с включением, так и с исключением количественно оцененных переменных. Случай двухвариантного прогноза (ЗСП/не-ЗСП) был подробным образом обработан, однако приводятся вкратце и результаты трёхвариантного прогноза (ЗСП/потенциальные ЗСП/не-ЗСП). Мы объединили наши данные в 508 групп, гомогенных

по отношению к ЗСП, TVM, TFM, и OAT. Переменные TTKT1-2 и TFAK1-2 были рассчитаны как средневзвешенные от соответствующих количественно оцененных переменных, генерированных HOMALS. Взвешивание происходило по площадям контуров.

Было использовано 4 метода статистической обработки: линейная вероятностная модель, логистическая регрессия, дискриминантный анализ и классификационное дерево. Первые три являются стандартными методами статистического анализа, четвёртый же, как нам кажется, недооценивается в почвоведении, поэтому он рассматривается здесь более подробно.

Последовательное разделение данных в соответствии с некоторыми выбранными значениями переменных может быть представлено в виде классификационного и регрессионного дерева (CART) (Breimann et all, 1984.; Breimann-Friedmann, 1985). Виртуальное «дерево», использованное в данной работе было сгенерировано статистическим пакетом программ S-PLUS (1994). Алгоритм начинается со всего множества объектов и выбирает объясняющие (разделяющие) переменные, уточняя классификационное дерево.

Метод CART принимает категорийные переменные в качестве объясняющих переменных, но количество уровней разделения сильно ограничено (поскольку на уровне L категорийная переменная приводит к возникновению $2^{(L-1)}$ -1 подразделений). Переменные «Преобладающий тип ионов в грунтовых водах» (TKT, 29 уровней) и «Классы по гранулометрическому составу близких к поверхности отложений» (FAK, 18 уровней), были за пределами допустимого количества. Поэтому мы нуждаемся в методе количественной оценки для использования TKT и FAK как объясняющих переменных.

Результаты и обсуждение

Таблица 2 показывает кросс-таблицу, вычисленную для типов ЗСП и гидрогеологических переменных. Типы ЗСП приводятся на карте (Рис. 1а). Переменные в колонках – это категории (также приводятся оригинальные обозначения на Рис. 1) гидрогеологических карт. В Табл. 2 показаны относительные встречаемости категорий гидрогеологических карт (колонки) в пределах отдельных почвенных типов (строки), сравненные с общим покрытием той же

категории (вся колонка). Для этого мы подсчитали процентное отношение величин. В этом отношении нумератором служил процент площади определённой гидрогеологической категории (колонка) во всей области, занятой определённым почвенным типом (строка).

Деноминатором отношения был общий процент площади определённой категории (колонка) гидрогеологических карт в пределах Великой Венгерской равнины, который приводится в нижней строке Табл. 2 как общий % колонки. Когда это отношение было выше 1,5 – в ячейке таблицы ставилась заглавная X. Это означает, что встречаемость данного почвенного типа (строка) по крайней мере, на 50% больше в данной категории (колонка), чем средняя встречаемость категории (колонка). Когда отношение было менее 0,5, указывая на более низкую встречаемость, в ячейку ставилась точка. Когда отношения были в диапазоне от 0,5 до 1,5, это указывало на то, что встречаемость категории внутри почвенного типа была близка к средней встречаемости категории на всей исследованной территории, и в ячейке ставилась прописная x. Пустые ячейки показывали несуществующие комбинации картографических категорий.

Таблица 3 показывает, в каких категориях соответствующих карт какие типы почв имели наибольшее распространение.

Классы по гранулометрическому составу поверхностных отложений

В соответствии с опытом (Gardner, 1960), средние классы по гранулометрическому составу и утяжеление последнего с глубиной вызывает капиллярное поднятие влаги из грунтовых вод. В Венгрии А. де Зигмонд (Sigmond, 1927) прогнозировал большую засолённость в почвах с утяжеляющимся с глубиной гранулометрическим составом в связи с нулевым выщелачиванием солей. В противоположность указанным теориям, в данном исследовании категории с утяжелением с глубиной были мало распространены, и не показывали большего покрытия ЗСП, чем другие последовательности отложений.

Связь между типом ЗСП и классами по гранулометрическому составу поверхностных отложений (Табл. 4) была высокой, и раз-

ница в гранулометрическом составе между солонцами и солончаками ясно видна в Табл. 2. Удивительно, что солончаки и карбонатные ЗСП (№№ 3 и 4) тесно связаны с песками, и большая часть их находится в междуречье Дуная и Тисы на отложениях лёгкого состава). Солончаки-солонцы встречаются на песчаных, пылеватых и поверхностно глинистых отложениях. Для развития горизонта В со столбчатой/призматической структурой в солонцах, наиболее распространённых ЗСП в Венгрии, необходимо, чтобы в почвообразующей породе присутствовал тонкий материал. На половине территории Великой Венгерской равнины, покрытой ЗСП, солонцы и солонцеватые почвы встречаются в пределах долины Тисы, и они связаны с глинистыми категориями, такими как CCCCC, CSSSS и CSCSS. За исключением двух типов почв, все они показали наибольшую встречаемость либо в категории CCCCC, либо SSSSS (Табл. 3). Содовые солончаки-солонцы встречаются чаще всего на отложениях тяжёлого гранулометрического состава, подстилаемых гравием, отложенным Дунаем (CCGGG).

Таблица 4. **Матрица соответствия между изученными картами (n=16,601)**

Значения коэффициента неопределённости (значения T и их значимость в скобках) между					
Переменная (карта)	Класс по гранулометрическому составу	Преобладающие ионы	Содержание растворимых солей	Глубина залегания грунтовых вод	Абсолютный уровень грунтовых вод
Тип ЗСП	0.08 (61, 0.00)	0.13 (80, 0.00)	0.05 (44, 0.00)	0.03 (32, 0.00)	0.16 (93, 0.00)
Класс по гранулометрическому составу		0.07 (60, 0.00)	0.02 (34, 0.00)	0.02 (33, 0.00)	0.10 (77, 0.00)
Преобладающие ионы			0.10 (61, 0.00)	0.02 (27, 0.00)	0.16 (84, 0.00)
Содержание растворимых солей				0.01 (16, 0.00)	0.11 (49, 0.00)
Глубина залегания грунтовых вод					0.084 (49, 0.00)

Преобладающие ионы в грунтовых водах

Ряд исследователей (Eugster and Jones, 1979; Timpson and Richardson, 1986) показали, что в ходе процесса транспорта, парал-

лельно с увеличением концентрации, натрий имеет тенденцию преобладать в ионном составе грунтовых вод. В Венгрии Э. Эндреди (Endrédy, 1941) предложил модель аккумуляции солей в масштабе Карпатского бассейна, в которой первичный источник растворимых солей – выветривание риолитовых вулканических туфов в горных системах, окаймляющих Великую венгерскую равнину. Дождевые воды вымывают соли в грунтовые воды, которые стекаются в самые нижние точки равнины, и там, вследствие отношений растворимости, ионы натрия накапливаются.

Данные поддерживают эту концепцию. Соответствие типов почв с преобладающими ионами в грунтовых водах (Табл. 4) было высоким. В Табл. 2 солончаки значительно более распространены в районах, где в составе грунтовых вод преобладают ионы Mg и HCO_3, чем в среднем. Обычно ЗСП встречаются в районах, где преобладающий катион – Na и преобладающий анион – HCO_3. Табл. 3 показывает, что все типы почв имеют наибольшее распространение в районах с типом засоления грунтовых вод “Na bi” либо “Ca bi”, причём первый тип характерен для солонцов и солончаков-солонцов.

Общая концентрация растворимых солей в грунтовых водах

Часто существует тесная связь между засолённостью грунтовых вод и почв (Henry et al., 1985), поскольку большие концентрации солей в грунтовых водах увеличивают поток солей в почву, что было подтверждено для Венгрии (De Sigmond, 1927; Scherf, 1935; Endrédy, 1941; Darab, 1967).

Табл. 2 подтверждает эти идеи, поскольку встречаемость не-ЗСП выше в районах, где минерализация грунтовых вод менее 1 п/л. Табл. 3 показывает, что категория с концентрацией солей 1–5 г/л наиболее часто встречается в почти всех почвенных типах, соответственно, коэффициент неопределённости в Табл. 4 низок. Солонец, в отличие от содового солончака и содового солончака-солонца, имеет большую встречаемость, чем в среднем в случае, если засолённость грунтовых вод выше 5 г/л.

Глубина залегания грунтовых вод

Когда грунтовые воды залегают неглубоко, вероятность накопления солей в возрастает (Fullerton, Pawluk, 1987) в результате увели-

чения потоков солей в почву. В Венгрии существует несколько типов почв, которые могут быть связаны с высоким уровнем грунтовых вод, наиболее важные из которых луговые и торфянистые почвы, которые занимают 17% территории равнины. На Рис. 1 и в Табл. 1 большая часть этих почв была включена в категорию потенциальных ЗСП, поэтому соответствие типу почв было низким, как показывает коэффициент неопределённости (Табл. 4). Табл. 2 показывает, что встречаемость не-ЗСП больше в районах с глубоко залегающими грунтовыми водами, чем в среднем. Солончаки и солончаки-солонцы встречаются над более близкими к поверхности грунтовыми водами, чем солонцы. Луговые солонцы встречаются над более глубоко залегающими грунтовыми водами, чем солонцеватые луговые почвы. Табл. 3 показывает, что для каждого из типов почв наиболее частой категорией была глубина залегания грунтовых вод 2-4 м, поэтому соответствие для данной карты было наименьшим.

Другая причина, по которой встречаемость типов ЗСП показала низкое соответствие уровню грунтовых вод, связана с современной антропогенной откачкой грунтовых вод. Табл. 2 приводит значительно более низкие уровни грунтовых вод, чем обычно описывается для формирования типов ЗСП. Более того, соответствующие карты составлялись на основе наблюдений в течение двух десятилетий, без учёта сезонных и временных изменений уровня грунтовых вод.

Абсолютный уровень грунтовых вод над уровнем моря

ЗСП главным образом располагаются либо на самых низких, либо на близких к таковым позициях в аллювиальных топорядах (Fullerton, Pawluk, 1987), и могут быть охарактеризованы типичными диапазонами абсолютных высот. В соответствии с Л. Крейбигом и Э. Эндреди (Kreybig, Endrédy, 1935) и Э. Эндреди (Endrédy, 1941), встречаемость ЗСП в пределах Великой Венгерской равнины ограничена некими зонами с определёнными диапазонами абсолютных высот. Эти авторы установили, что абсолютные высоты имеют сильное влияние на распространение ЗСП опосредованно, через уровень грунтовых вод, поэтому уровень грунтовых вод, выраженный в абсолютных отметках превышений, как ожидалось, должен быть фактором, сильно связанным с встречаемостью ЗСП.

Эта концепция уверенно подтвердилась нашими данными. Связь с типами почв была самой высокой. В Табл. 2 не-ЗСП чаще встречаются в категориях с более высоким уровнем грунтовых вод. Большая часть солончаков встречается на высотах 90–100 м, но некоторые встречаются на высотах залегания грунтовых вод от 120 до 140 м. Последние встречаются в верхней части долины Тисы, над маленькими карманами неглубоко залегающих засолённых грунтовых вод. Разница между высотами уровня грунтовых вод солончаков и карбонатных луговых солонцов показывает, что последние находятся ниже, близко к р. Тиса. Разница между высотами долин Дуная (более высокие) и Тисы ясно отражается в том, что луговый солонец (типичный для долины Тисы) встречается при более низких абсолютных уровнях залегания грунтовых вод, чем солончаки. Табл. 3 показывает, что в верхнем течении Тисы встречаемость луговых солонцов (абсолютный уровень грунтовых вод 85–90 м над уровнем моря) выше, чем в нижнем течении.
Табл. 3 показывает, что бескарбонатный солонец и связанные с ним почвы (3, 7, 8, 9, и 10) часто встречаются в сходных условиях (глина, Na и HCO_3 преобладают в грунтовых водах, 80–90 м над уровнем моря). Содовый солончак и карбонатный солонец (2, 4, и 6) наиболее часто встречаются на песке в случае, если Ca – преобладающий ион в грунтовых водах. Одна комбинация наиболее распространённых категорий делилась двумя типами почв: луговым солонцом и солонцеватой луговой почвой (7 и 9), которые очень похожи и разделяются только на основании структурных особенностей горизонтов A и B.

Взаимная зависимость гидрогеологических переменных

Как показывает Табл. 4, ассоциации, выраженные через коэффициент неопределённости, между гидрогеологическими переменными были не так сильны, как ассоциации типов ЗСП с гидрогеологическими переменными. Это доказало, что гидрогеологические переменные и ЗСП имели множественные взаимные связи.

Все рассчитанные ассоциации были значимыми в силу большого количества контуров. Ассоциации не могут быть улучшены дополнительным отбором образцов, поскольку количество образцов и так было достаточным. Разница между ассоциациями показывает

степень взаимной зависимости. Самые высокие значения были обнаружены для ассоциаций а) преобладающий тип ионов и абсолютный уровень грунтовых вод (0,16), б) концентрация растворимых солей и абсолютный уровень грунтовых вод (0,16), в) класс по гранулометрическому составу и абсолютный уровень грунтовых вод (0,10), г) преобладающий тип ионов и концентрация растворимых солей (0,10). Величины коэффициента неопределённости ненамного меньше, чем нижний предел в 0,13, предложенный русскими почвоведами (Сорочкин, 1977). Результаты подтверждают важность учёта не отдельных факторов, а комбинации взаимодействующих факторов для формирования ЗСП. Пески и лёссы, отложенные в форме дюн и плато, быстро выщелачиваются, и в этом случае уровень грунтовых вод низок, но на пониженных участках, в современных аллювиальных долинах, уровень грунтовых вод высок, и тяжёлые глинистые отложению благоприятствуют накоплению солей. Благодаря небольшой глубине залегания грунтовых вод испарение последних выше, и соответственно возрастает концентрация солей в грунтовых водах. Из-за разницы в растворимости солей в грунтовых водах соли Ca и Mg осаждаются при более низких концентрациях, и поэтому в большей части грунтовых вод имеется тенденция к доминированию наиболее растворимых сульфатов и хлоридов натрия в более засолённых грунтовых водах.

Эта схема подтверждает теории, выдвинутые рядом венгерских учёных (Endrédy, 1941; Várallyay, 1967; Erdélyi, 1979; Tóth, 1984) о роли аккумуляции солей в масштабе бассейна и их концентрации в грунтовых водах.

Прогноз засолённых почв с помощью регрессионных методов

Результаты использования методов множественной линейной и логистической регрессии для прогноза засолённости почв приводятся в Табл. 5. В случае использования ординированных переменных: TFM или «Абсолютный уровень грунтовых вод над уровнем моря», TVM или «Глубина залегания грунтовых вод», OAT или «Общая концентрация растворимых солей в грунтовых водах», наблюдалась слабая корреляция, объясняющая только 15% общего варьирования. Логистическая регрессия дала значительно лучшие результаты с точностью около 70%, однако точность прогноза присутствия ЗСП была всего 31%.

Таблица 5. **Сводка регрессионных моделей и оцененных параметров**

А. Множественная линейная регрессия

	Без номинальных переменных	С вычисленными номинальными переменными
R2	0,149	0,296
Остаточный MS	0,183	0,151
F-тест модели	253	363
P>F	0,0000	0,0000
	Оценки параметров	
Пересечение	-0,399 (0,042)	0,550 (0,040)
b1:TFM – абсолютный уровень грунтовых вод	-0,049 (0,002)	0,044 (0,004)
b2:TVM – глубина залегания грунтовых вод	-0,019 (0,008)	-0,078 (0,007)
b3:OAT – концентрация солей	0,083 (0,112)	-0,119 (0,012)
b4:TTKT1 – тип ионов	не включён	-0,317 (0,015)
b5:TFAK1 – гранулометрический состав	не включён	-0,187 (0,020)

А. Множественная логистическая регрессия

	Без номинальных переменных	С вычисленными номинальными переменными
Общая точность, %	69	79
Точность для засолённых почв, %	31	63
Хи-квадрат модели	791	1548
Значимость	0,0000	0,0000
	Оценки параметров	
Пересечение	0,334 (0,256)	1,830 (0,339)
b1:TFM – абсолютный уровень грунтовых вод	-0,347 (0,018)	0,333 (0,036)
b2:TVM – глубина залегания грунтовых вод	-0,239 (0,050)	-0,964 (0,071)
b3:OAT – концентрация солей	0,409 (0,063)	-1,007 (0,097)
b4:TTKT1 – тип ионов	не включён	-2,022 (0,127)
b5:TFAK1 – гранулометрический состав	не включён	-1,682 (0,167)

У нас имелось ещё две переменные, которые было невозможно включить в анализ, поскольку они были номинальными («преобладающие типы ионов в грунтовых водах» и «Классы по гранулометрическому составу поверхностных отложений»), поэтому мы использовали для их численного выражения программу HOMALS.

Регионализация районов засоления

Районы засоления почв в Венгрии неоднократно подразделялись на регионы (Treitz, 1924, 1934; De Sigmond, 1927; Arany, 1956; Herke et al., 1959). Поскольку иерархическая таксономия регионов Великой Венгерской равнины, представленная Шомогьи (Somogyi, 1991) показала хорошее соответствие с ранее цитированными предложениями, мы приняли их как единицы, отражающие пространственную природу накопления солей. Карта регионов (Рис. 2) показывает, что регионы с высоким покрытием ЗСП образуют почти непрерывный контур (микрорегионы 1.7.13, 1.7.21, 1.12.11, 1.12.12, 1.12.21). Регионы с меньшими площадями, занятыми ЗСП, образуя постепенные переходы, окружают регионы с высоким содержанием ЗСП. На западном конце Великой Венгерской равнины у р. Дунай находится участок, ориентированный с севера на юг (микрорегионы 1.1.21., 1.1.22, 1.1.23), который включает большую часть участков, занятых солончаками-солонцами.

Таблицы соответствия мезорегионов (Табл. 6 и 3) были использованы при трансформации вышеуказанных двух категорийных переменных процедурой HOMALS как описано в Материалах и методах. В первой строке (исходный код на карте 21) и колонке Табл. 6 число «435» показывает площадь (в км^2) территории, имеющей последовательность отложений по гранулометрическому составу SSSSS (песок для всех 2-метровых слоёв 10-метровой толщи), находящейся в пределах мезорегиона № 1. Номер «31» в последней строке Табл. 7, для которого исходный код на карте – 108, показывает площадь (в км^2) территории, где преобладающие ионы в грунтовых водах Ca/Mg/Na и бикарбонат/Cl. Эта территория попадает в пределы мезорегиона № 8.

Количественное выражение номинальных переменных

Рис. 3 и 4 показывают отношение новый переменных, полученных методом HOMALS к категориям гидрогеологических карт, из которых они были получены. На Рис. 3 позиция категорий карты «Классы по гранулометрическому составу поверхностных отложений» показана в плоскости двух выраженных количественно переменных гранулометрического состава, TFAK1 и TFAK2. Глинистые

последовательности обычно встречаются около –1 и 0,5, песчаные последовательности около 1 и 0, а смешанные гравийные – около 0 и –5. Между ними находятся пылеватые последовательности от –0,4 и 0,8 до 0,6 и 0,8. Основной фактор группировки на рисунке был тип поверхностных отложений, за исключением гравийных последовательностей, поскольку гравий не встречался на поверхности. Таким образом, TFAK1 представляет собой переменную глины – пыли – смешанного гравия – песка, что может быть интерпретировано как серия отложений медленных потоков – быстрых потоков – эоловых наносов. TFAK2 выражает контраст серий смешанных гравийных последовательностей – более гомогенных последовательностей.

Таблица 6. **Таблица соответствия карт «Таксономическое разделение регионов Венгрии» и «Классы по гранулометрическому составу поверхностных отложений Великой Венгерской равнины» в форме площадей контуров, полученных при их наложении**

	Мезорегионы												
	Код	1.1	1.1	1.3	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	Сумма
SSSSS	21	435	2400	414	264	334	66	946	3766	30	87	168	8911
SSCCC	22	75	1528	288	32	87	141	99	292	15	10		2568
SCCCC	23	13	117	83	11	105	21		12			8	370
SISSI	24	153	1610	317			124		140	14			2358
SSGGG	25	342	15					235					592
SCSCC	26				12	62		8	2		47		131
SCGGG	27	154											154
IIIII	31	2	150	222		84	24		0	176			658
IISSS	32	4	128	77		564	150		1	134	80	493	1631
ISSSS	33	123	17	104	42	146	323		42	42	46	5	890
ISIIS	34	16	417	479	1	4	45		79	53			1095
ICCCI	36						2			8	25	44	79
CCCCC	41	60	207		1005	4552	515	1759	74	831	2379	3184	14565
CCSSS	42	398	40	4	910	426	99	194	84	251	536	319	3261
CSSSS	43	1073	122	7	227	533	57	176	25		656	672	3549
CICII	44	73	141			88	29			56	11	37	434
CCGGG	45	870	24					79					972
CSCSS	46		40		107	128	12	294	33		358	208	1180
Сумма, км^2		3789	6958	1994	2610	7114	1608	3790	4551	1611	4235	5138	43398

Примечания: обозначения по гранулометрическому составу см. Табл. 2
Коды последовательностей отложений соответствуют карте (Рис. 1б)
Индексы регионов см. Рис. 2.

Таблица 7. **Таблица соответствия карт «Таксономическое разделение регионов Венгрии» и «Преобладающие ионы в грунтовых водах Великой Венгерской равнины» в форме площадей контуров, полученных при их наложении**

Катионы	Анионы	Мезорегионы												
			1.1	1.2	1.3	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	Сумма
Na	biClsu	10					76	7			2		89	173
Na	Cl	11					18	28					12	58
Na	su	14		98			600	69	98		41	52	355	1314
Na	subi	16											38	38
Na	bi	17	934	1177	221	21	3842	677	560	142	1290	1662	4092	14617
Na	bisu	19											26	26
NaMg	su	24		2			118		48					168
NaMg	bi	27					38		36	22	19	16		131
NaMg	bisu	29						23						23
NaCa	bi	37					13							13
NaCa	biCl	38										23		23
Mg	su	44	57											57
Mg	subi	46	19											19
Mg	bi	47	246	958	551		28	1	333	52		6		2185
MgNa	Cl	54					3		46					49
MgCa	su	66	27											27
MgCa	bi	67	598	95	171									864
Ca	Cl	71					11							11
Ca	Clsu	72				9								9
Ca	su	74		5		234	60	92	36	10		30		467
Ca	subi	76				13								13
Ca	bi	77	1533	4272	944	2216	1917	626	2310	4313	260	2248	433	21071
Ca	bisu	79		13										13
CaNa	biClsu	80					13	1						14
CaNa	bi	87	27	19	18	80	52							196
CaMg	bi	97	142	240	55		17	1	87			25		568
CaMgNa	su	104				13				12		57	21	104
CaMgNa	bi	107	208	69	35	23	308	52	235		1	115	73	1117
CaMgNa	biCl	108						31						31
Сумма, км^2			379	6958	1994	2610	7114	1608	3790	4551	1611	4235	5138	43398

На Рис. 4 позиция категорий карты «Преобладающие типы ионов в грунтовых водах» показана в плоскости двух количественно определённых переменных типа ионов. Имеется три группы связанных с Na (-2, 0), Ca (0,4, -2) и Mg (1, 4).Анионы имеют меньшее значение, преобладание хлоридов может быть обнаружено около –2,5 и 0, суль-

фатов около –1,8 и 0, бикарбонатов у –1,3 и 0, опять сульфатов у 0 и –2 и опять бикарбонатов у 1 и 1. Поэтому TTKT1 (количественно оцененный тип ионов) может рассматриваться как переменная от Na – Mg/Ca, выражая уменьшающуюся растворимость солей. TTKT2 может рассматриваться как переменная от сульфатов–бикарбонатов.

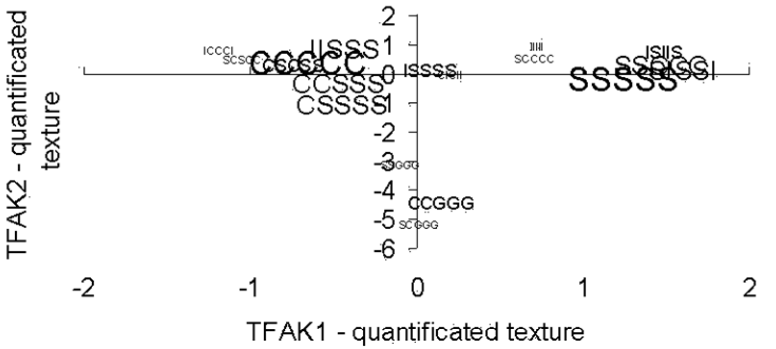

Рис. 3. **Основные элементы карты «Классы по гранулометрическому составу поверхностных отложений» в плоскости двух количественно определённых переменных. Категории с большим территориальным распространением (Табл. 6) показаны более крупным шрифтом. Кодировка та же, что в Табл. 2 и Рис. 1**

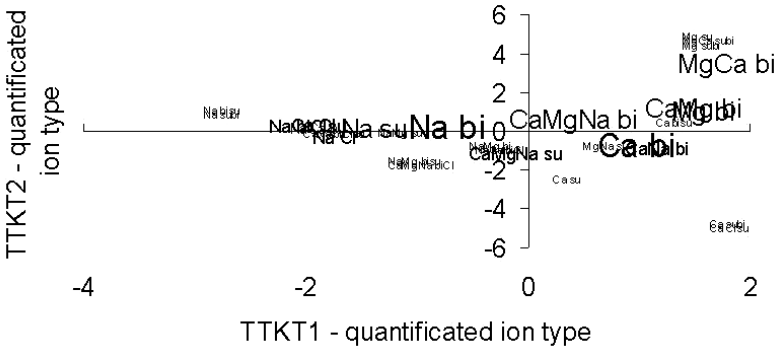

Рис. 4. **Основные элементы карты «Преобладающий тип ионов в грунтовых водах» в плоскости двух количественно определённых переменных. Категории с большим территориальным распространением (Табл. 7) показаны более крупным шрифтом. Кодировка та же, что в Табл. 2 и Рис. 1**

Первые из числовых переменных, TTKT1 – количественно выраженный тип ионов и TFAK1 – количественно выраженный гранулометрический состав (Табл. 5) были использованы в регрессионном анализе. В случае множественной линейной регрессии это привело к росту объяснения общей вариабельности с 15 до 30%, но всё же объяснительная способность оставалось низкой. В случае логистической регрессии включение двух новых переменных улучшило точность до почти 80%, но всё же для ЗСП она оставалась не очень высокой (69%). Дальнейшее включение TKT2 и TFAK2 (результаты не приводятся) не привело к существенному повышению точности.

Низкая результативность данного метода оценки может быть объяснена тем, что отношение объясняющих переменных и процесса накопления солей не являются ни линейными, ни аддитивными. Поэтому мы обратились к методу классификационного дерева.

Классификационное дерево для прогноза присутствия засолённых почв

На Рис. 5 мы представляем наиболее важные результаты, полученные методом CART, как объяснено в Материалах и методах. При разделении были использованы все численные переменные, обсуждавшиеся ранее: TTKT1, TFAK1, TFM, OAT и TVM. Основные разделения отмечаются в плоскости TTKT1 – количественно выраженных типов ионов и TFAK1 – количественно выраженного гранулометрического состава поверхностных отложений на Рис. 6. В этой плоскости концептуально вероятность накопления солей находится в обратной зависимости от значений TFAK1 и TTKT1 как обсуждалось ранее. В случае преобладания тонких частиц (ила и пыли) в почве и подповерхностных материалах, движение растворов медленно, однако глубина слоёв, подверженных капиллярным подъёмом, велика. Соответственно, соли могут проникать в почву из грунтовых вод и впоследствии с трудом выщелачиваются. Песок и гравий не имеют высокого капиллярного поднятия из грунтовых вод и позволяют солям быстро выщелачиваться из поверхностных слоёв. Когда Na преобладает в катионном составе грунтовых вод, он немедленно воздействует на почвенные свойства, особенно если почва глинистая, в силу внедрения ионов Na в поглощающий комплекс. Ионы Mg действуют приблизительно так же, как и натрия,

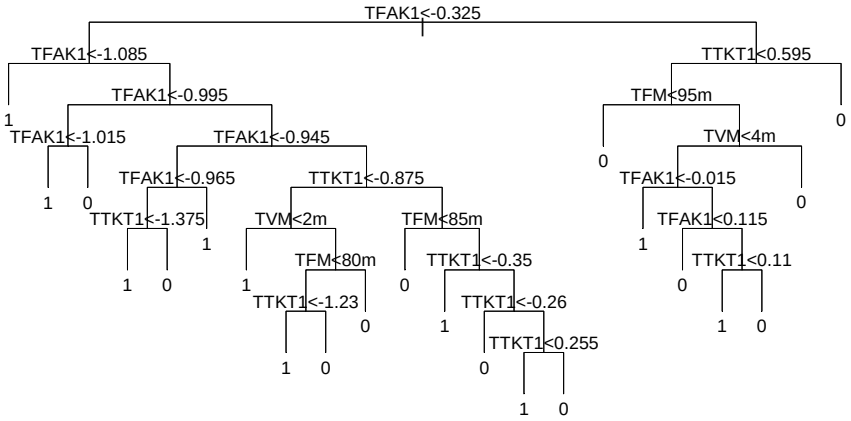

Рис. 5. **Классификационное дерево для разделения засолённых почв (1) от незасолённых почв (0). Степень неправильной классификации 0,036**

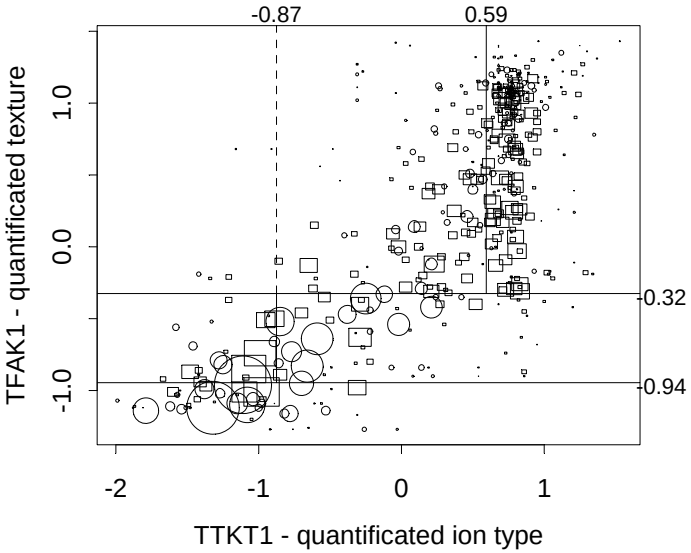

Рис. 6. **Основные расщепления классификационного дерева в плоскости TTKT1 (количественно оцененный тип ионов) – TFAK1 (количественно оцененный гранулометрический состав с указанием засолённых (○) и незасолённых почв (□). Размер символов отражает относительную площадь, занимаемую почвами**

но ионы Ca обычно не вызывают накопления солей в условиях Великой венгерской равнины. Основная тенденция, определяемая различиями в поведении основных катионов, модифицируется преобладающими анионами. Концентрация сульфатов обычно более тесно связана с накоплением солей, чем присутствие бикарбонатов, особенно если концентрация сульфатов высока. Причина этого лежит в том, что в ходе потока и концентрации грунтовых вод происходит изменение её состава, и при высоких концентрациях солей в грунтовых водах сульфаты всё более преобладают.

Разделения обсуждаются, как показано на Рис. 6, который также принимает во внимание размер отдельных листьев (окончательных продуктов подразделения на концах ветвей). Первое разделение было произведено при TFAK1 – количественно оцененном гранулометрическом составе = -0,325, и оно разделяет отложения с поверхностным глинистыми или пылеватыми слоями, в которых встречаемость накоплений солей значительно выше, чем в других. На левой ветви дерева, разделение при TFAK1=–1,085 и главным образом при TFAK1=-0,945 отделяют наиболее экстремально глинистые случаи накопления солей, в которых доминирует Na; результирующая полоса – это «Na-глинистая полоса». После небольших (учитывая пространственное распространение) расщеплений в пылеватой полосе, выделяется одно существенное при TTKT1 – количественно выраженном ионном составе = -0,875, которое отделяет типы грунтовых вод с преобладанием Na и бикарбонатов от грунтовых вод, где преобладает Na/Mg/Ca и сульфаты. Сульфаты связаны с большей вероятностью аккумуляции солей («Na/Mg/Ca-пылеватая-пылеватая полоса») и часть полосы < -0,875 имеет меньшее покрытие засолённых почв. В этой «Na-бикарбонат-пылеватой» полосе преобладание пылеватой фракции связано с лёссовыми отложениями, которые содержат $CaCO_3$ и при выветривании легко продуцируют ионы Na, поскольку содержат полевые шпаты (Szendrei, 1989)[1]. В то же время, следующее расщепление на левой ветви показывает, что подверженные засолению районы имеют бо-

[1] Это утверждение остаётся целиком на совести автора; натриевые полевые шпаты – одни из самых устойчивых к выветриванию минералов, и трудно говорить о «лёгкости», с которой натрий переходит в раствор при выветривании натриевых плагиоклазов в условиях умеренного климата (ред.)

лее высокий уровень грунтовых вод (расщепление при TVM – глубина залегания грунтовых вод < 2 м) и обычно залегают ниже (расщепление при TFM – абсолютный уровень грунтовых вод < 80 м, как показано в Табл. 2), чем не-ЗСП. На правой ветви дерева расщепление при TTKT1=0,595 разделяет две области с низким содержанием ЗСП. Тем не менее, выделяются «Ca/Mg-песчано-песчаная полоса», где преобладание сульфатов указывает на несколько большую вероятность засоления, в то время как «Ca/Mg-бикарбонат-песчаная полоса» не подвержена засолению. Общая точность классификационного дерева приемлема: 96%, при этом для ЗСП 91% и для не-ЗСП – 99%.

Рис. 7. показывает основные расщепления и позиции микрорегионов, отражённых на Рис. 2 и в Табл. 2 и 3 в плоскости двух количественно определённых переменных. Мезорегионы хорошо выделяются. Практически не наблюдается пересечения между ними, хотя мезорегионы № 9 и 1 расположены близко. Эти территории различны в отношении абсолютного уровня грунтовых вод, № 9 равномерно расположен между 95 и 130 м, а № 1 имеет большую часть своей территории с абсолютным уровнем грунтовых вод ниже 95 м.

Участки Южной и Средней долины Тисы, расположенные в нижней левой части Рис. 7 (отрицательные значения TTKT1 и TFAK1) образуют более или менее непрерывную секцию. Участки Северной долины Тисы расположены в нижней правой части (положительные значения TTKT1 и отрицательные – TFAK1). В средней правой части (около положительных значений TTKT1 и нулевых – TFAK1) располагаются микрорегионы долины Дуная. Песчаные участки прочих территорий Великой Венгерской равнины располагаются в верхней правой секции. Микрорегион 1.2.11. «Герье-Перье» находится вне своего мезорегиона «Долина междуречья Дуная и Тисы», и приближается к своему геометрическому соседу, 1.8.12. «Южная долина Тисы», и это вызывает сомнения в подразделении региона № 8 «Нижняя долина Тисы». Сходным образом 1.12.14. «Лёссовое плато Эр-шиде» лежит вне региона № 12 «Береттьо-Кёрёш», а также мезорегионы № 11 «Хайдушаг», 1.7.2. «Нагикуншаг», и № 13 «Междуречье Кёрёш-Марош» показывают значительный разброс.

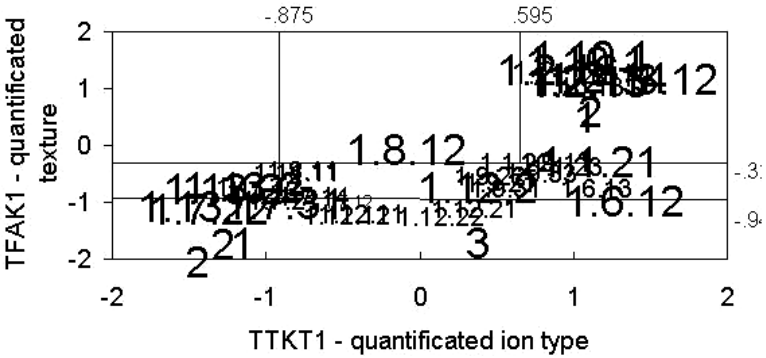

Рис. 7. **Основные расщепления классификационного дерева в плоскости TTKT1 (количественно оцененный тип ионов) – TFAK1 (количественно оцененный гранулометрический состав с указанием основных микрорегионов. Микрорегионы с большей площадью (Рис. 1) показаны более крупными шрифтами. Обозначения микрорегионов теже, что и на Рис. 1**

Рис. 8 показывает классификационное дерево трёх категорий, в данном случае также выделяя потенциально засолённые почвы и почвы, которые могут стать засолёнными или содовыми в результате неправильной ирригации. Переменные использовались те же, что и в Рис. 5. Общая точность прогноза была приемлемой – 91%, 87% для ЗСП, 92% для потенциальных ЗСП и 94% для не-ЗСП. В этом случае опять наиболее важные расщепления были в плоскости TTKT1 (количественно оцененный тип ионов) – TFAK1 (количественно оцененный гранулометрический состав). Большинство расщеплений соответствует с таковыми на Рис. 5, однако присутствует ещё один, первое расщепление по TTKT1 (количественно оцененный тип ионов) = 0,265. С левой стороны расщепления находятся участки, где преобладающий катион Na, имеющие большую вероятность накопления солей, а справа – грунтовые воды с преобладанием Ca/Mg, где отложения представлены песчаными последовательностями. С левой стороны дерева первым отделяется «Na-глинистая полоса», затем следующее расщепление отделяет верхний левый угол плоскости TTKT1 – TFAK1 как главным образом потенциально засолённые. Продолжая движение полевой стороне, мы оказываемся на тех же вервях, что мы видели и на двух-

категорийном классификационном дереве на Рис. 5. С правой стороны дерева, сначала нижний левый угол плоскости TTKT1 – TFAK1 разделяется на значении TFAK1 (количественно выраженного гранулометрического состава) = 0. Следующее расщепление при TTKT1=0,685 отделяет главным образом не-ЗСП с правой стороны, вследствие преобладания Ca и Mg в грунтовых водах. С левой стороны расщепление продолжается и классы, имеющие больше глины (TFAK1 < 0,135) потенциально подвержены засолению, а на других ветвях большая глубина залегания грунтовых вод под поверхностью или более высокий абсолютный уровень грунтовых вод указывает на меньшую вероятность накопления солей.

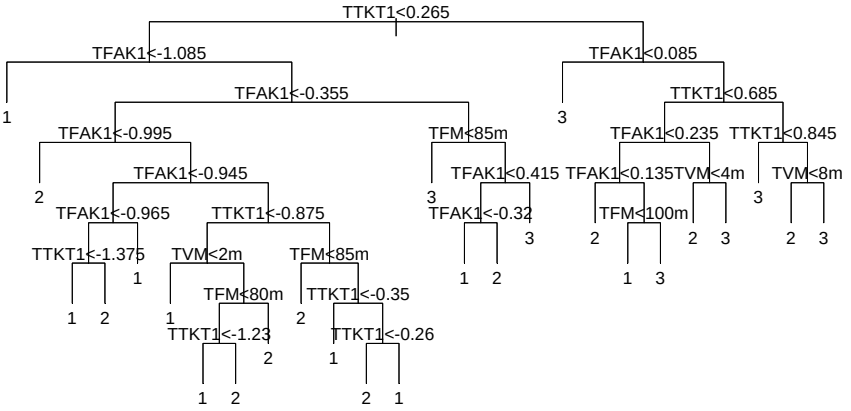

Рис. 8. **Классификационное дерево для разделения засолённых почв (1) от потенциально засолённых почв (2) и незасолённых почв (3). Степень неправильной классификации 0,088**

Обсуждение и заключение

Когда почвенные карты оцениваются в отношении распространения факторов почвообразования, может быть получен более глубокий взгляд на процессы, отвечающие за пространственное распределение почв. Мы оцифровали существующую карту ЗСП (зависимую переменную) и пять карт гидрогеологических и химических параметров (независимые переменные), и определили статистическую зависимость между почвами и внешними факторами для почв Великой Венгерской равнины.

Независимые переменные: абсолютный уровень грунтовых вод над уровнем моря, химический состав грунтовых вод и классы отложений по гранулометрическому составу сильнее всего, в убывающем порядке, коррелировали с типом почв (Табл. 4). В междуречье Дуная и Тисы самые распространённые типы почв, солончаки, солончаки-солонцы, карбонатные луговые солонцы и карбонатные солонцеватые луговые почвы, встречаются над неглубоко залегающими грунтовыми водами. Солончаки встречаются в двух диапазонах частотного распределения в отношении абсолютного уровня грунтовых вод: один на уровне долины Дуная, и другой на различных высотах в междюнных понижениях в песчаных районах. В отличие от долины Тисы, встречаемость солонцов и солонцеватых почв была связана с более узким диапазоном абсолютных уровней грунтовых вод.

Статистическое отношение между факторами и почвами подтверждает важность комплексной модели, а не отдельно взятых факторов во встречаемости ЗСП, как было отмечено Г. Вараллеем (Várallyay, 1967) для долины Дуная. В этой модели присутствует взаимное отношение позиции по рельефу, глубины залегания, концентрации и состава грунтовых вод. На больших абсолютных высотах междуречья Дуная и Тисы обнаруживаются незасолённые грунтовые воды с преобладанием Ca, а в локальных долинах солончаки обнаруживаются обычно над концентрированными грунтовыми водами. Напротив, на малых абсолютных высотах долины Тисы, где обнаруживаются грунтовые воды с преобладанием Na, солонцовые почвенные типы чаще всего формируются на обширных ровных участках.

Значения коэффициентов неопределённости между картами были низкими, но все были статистически значимыми при $p < 0{,}0001$ и сравнимыми с ранее сообщавшимися. Возможная причина, по которой коэффициенты неопределённости так малы, связана с тем, что современная антропогенное воздействие привело к падению уровня грунтовых вод. Это, кроме того, приводит к тому, что почвы изменяются в соответствие с новой гидрологической ситуацией, и солончаки превращаются в солончаки-солонцы (Tóth and Blaskó, 1998).

Исследованные факторы, как сообщалось ранее, влияют на распространение ЗСП на Великой Венгерской равнине. Важность глубины залегания грунтовых вод (Mados, 1943; Darab, 1967) и концентрации солей в грунтовых водах (De Sigmond, 1927; Scherf,

1935; Endrédy, 1941; Erdélyi, 1979) обсуждались наиболее широко, а абсолютный уровень грунтовых вод над уровнем моря обсуждался несколькими исследователями (Kreybig and Endrédy, 1935, Endrédy, 1941). Важность распределения частиц по размерам и стратификации отложений подчёркивалась А. Де Зигмонтом (De Sigmond, 1927) и в последние годы Р. Дж. Эйлерсом с соавторами (Eilers et al., 1997) и Дж. М. Бреддом с соавторами (Bradd et al., 1997), как описывалось во Введении. В Венгрии К. Дараб (Darab, 1967) подчеркнул относительную важность натрия в формировании ЗСП. Г. Вараллай (Várallyay, 1968) соотнёс различные химические типы грунтовых вод с разными типами почв в долине Дуная. В особенности преобладание натрия было тесно связано со встречаемостью солончаков, в то время как преобладание кальция было связано с аллювиальными почвами. Отношение между химическим составом грунтовых вод и засолённостью почв отмечалось также рядом зарубежных исследователей (Benz at al., 1961; Bazilevich, 1970; Arndt and Richardson, 1989).

Существуют многочисленные теории, которые объясняют различия в высотах, глубине залегания, концентрациях и химическом составе грунтовых вод между бассейнами; такова теория потока грунтовых вод Т. Тота (Tóth, 1984) и ряд теорий, предложенных для долины Дуная (Kovács, 1960; Várallyay, 1968; Kuti, 1989).

Выделение крупных регионов – обычная практика в географии, это одна из первых вещей, которая делается при возникновении научной проблемы. В Венгрии выделенные регионы, как кажется, хорошо представляют закономерности накопления солей. В процессе трансформации переменных FAK (Классы по гранулометрическому составу поверхностных отложений) и TKT (Преобладающие типы ионов в грунтовых водах) из номинальных в численные, алгоритм HOMALS дал сходные точки масштаба обозначениям карт, которые часто встречались вместе.

Точность прогноза встречаемости ЗСП систематически возрастала с включением количественно оцененных номинальных переменных. Логистическая регрессия дала лучший прогноз, однако по-прежнему недостаточный для прогноза.

Использование классификационного дерева позволило точный прогноз встречаемости ЗСП. По сравнению с точностью 69%, полу-

ченной с помощью логистической регрессии, классификационное дерево дало точность 73% без включения новых количественно оцененных переменных (классификационное дерево и детали не приводятся). После включения TKT1 – количественно оцененного типа ионов и TFAK1 – количественно оцененных классов по гранулометрическому составу, общая точность возросла до 96% при прогнозе наличия ЗСП или не-ЗСП. Гидрологические процессы, ответственные за формирование засолённых почв, могут служить обоснованием важности карты «Классы по гранулометрическому составу поверхностных отложений», как обсуждалось выше. Более того, существует тесная взаимосвязь между происхождением и геоморфологическим положением этих отложением и их классом по гранулометрическому составу. Песок на поверхности обнаруживается в районах распространения эолового переноса песков, пылеватые формации типичны для районов распространения лёссов, а глины преобладают в современных ручных долинах. Сходным образом, песок на поверхности связан с самыми высокими по топографии районами Великой Венгерской равнины, пылеватые отложения с лёссовым плато на средних высотах, а глина – с наиболее пониженными участками современных речных долин. Поскольку речные долины включают наибольшее количество засолённых почв, присутствие последних может быть относительно хорошо предсказано на основании класса по гранулометрическому составу поверхностных отложений. Следовательно, в Табл. 6 мезорегионы, подверженные засолению (Рис. 2), например, №№ 7, 12 и 13, имеют в основном глинистые последовательности отложений.

Важность карты «Преобладающие типы ионов в грунтовых водах» может быть обоснована упомянутыми тенденциями растворимости солей натрия по сравнению с солями кальция и магния. Следовательно, в Табл. 7 мезорегионы, подверженные засолению, демонстрируют преобладание Na и бикарбонатов. Следовательно, существует явное влияние преобладающего типа аниона в грунтовых водах. Схема, нарисованная по данным А. Ронаи (Rónai, 1961) (Рис. 9.) показывает, что с возрастанием концентрации солей в грунтовых водах при концентрациях 2,5 г/л сульфаты и хлориды начинают преобладать над бикарбонатами. Взгляд на исходные диапазоны карты «Общая концентрация растворимых солей в грунтовых водах» (Рис. 1) показывает, что этот важный диапазон

концентраций попадает в наиболее распространенную категорию карты, 1–5 г/л. Ясно, что для исследования почвообразования требуется более детальная информация, но в цели составителей карты не входило представить специфическую информацию такого рода. Следовательно, использование HOMALS и классификационного дерева помогло в замещении информации об этом важном диапазоне. Вместо прямого использования более детального подразделения концентраций солей в грунтовых водах тип анионов предоставил столь же полезную информацию, поскольку обычно преобладание сульфатов соответствует концентрациям более 2, 5 г/л, а преобладание бикарбонатов менее этой величины.

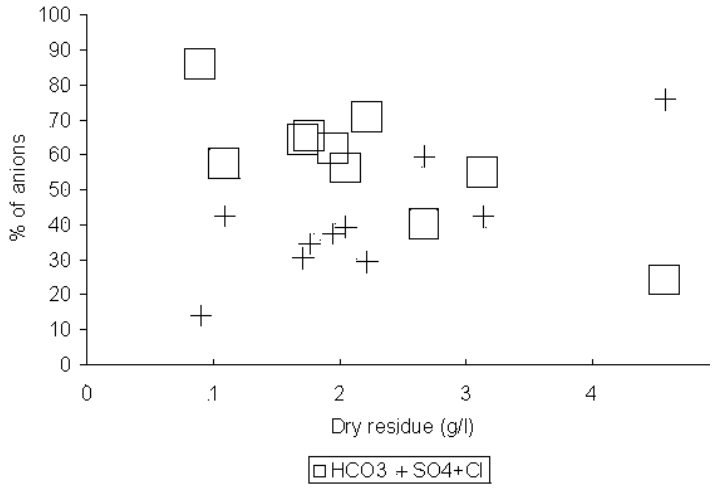

Рис. 9. **Изменения в преобладании анионов в зависимости от их концентрации в грунтовых водах в районе Хортобаги, по данным А. Ронаи** (Rónai, 1961)

Подход, использованный в данной работе для прогноза встречаемости засолённых почв путём использования гидрогеологических карт, легко применим, если доступны номинальные переменные для переведения в категории факторов накопления солей и если классические статистические тесты не могут быть применены из-за строгих ограничений по их использованию.

Литература

Сорочкин В.М. Об использовании информационно-логического метода в почвенных исследованиях // Почвоведение, 1997, № 9, с. 131-139.

Arany S. Salt-affected soil and its reclamation. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1956.

Arndt J.L., Richardson J.L. Geochemistry of hydric soil salinity in a recharge-throughflow-discharge prairie-pothole wetland system // Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, v. 5, p. 3848-855

Bazilevich N.I. The geochemistry of soda soils. USDA, NSF and Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1970.

Benz L.C., Mickelson R.H., Sandoval F.M., Carlson C.W. Groundwater investigations in a saline area of the Red river valley, North Dakota // J. Geophys. Res., 1961, vol. 66, p. 2435-2443.

Bradd J.M., Milne-Home W.A., Gates G. Overview of factors leading to dryland salinity and its potential hazard in New South Wales, Australia // Hydrogeology J., 1997, vol. 5, p. 51-67.

Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J. Classification and regression Trees. Monterey: Wadsworth and Brooks/Cole, 1984.

Breiman L., Friedman J.H. Estimation optimal transformations for multiple regression and correlation (with discussion) // J. Amer. Statistical Assoc., 1985, vol. 80, p. 580-619.

Bui E.N., Krogh L., Lavado R.S., Nachtergaele F.O., Tóth T., Fitzpatrick R.W. Distribution of sodic soils: the world scene. *In*: M. E. Sumner and R. Naidu (eds.) Sodic soils. Distribution, properties, management and environmental consequences. Oxford University Press, New York, 1998.

Daineko E.K., Fridland V.M. Practical application of information and logic analysis to show interrelations between soil-forming factors and certain morphological properties of soils. *In*: V.M. Fridland (ed.) Soil combinations and their genesis. Amerind Publising, New Delhi, 1972, p. 236-246.

Darab K. Remarks on the study of Dr. H. Franz "Data on the Quaternary stratigraphy and the formation of salt-affected soils in Hortobágy and its periphery"// Agrokémia és Talajtan, 1967, v. 16, p. 459-468. (in Hungarian)

Eilers R.G., Eilers W.D., Fitzgerald M.M. A salinity risk for soils of the Canadian prairies // Hydrogeology J., 1997, vol. 5, p. 68-79.

Endrédy E. On the question of the formation of salt-affected soils // Öntözésügyi Közlemények, 1941, vol. 3(1), p. 207-217. (in Hungarian)

Erdélyi M. The hydrodynamics of the Hungarian Basin. VITUKI Közlemények, 1979, vol. 18.

Eugster H.P., Jones B.F. Behavior of major solutes during closed-basin brine evolution // Amer. J. Sci., 1979, vol. 279, p. 609-631.

Fullerton S., Pawluk S. The role of seasonal salt and water fluxes in the genesis of solonetzic B horizons // Canad. J. Soil Sci., 1987, vol. 67, p. 719-730.
Gardner W.R. Soil water relations in arid and semiarid conditions. In: Plant-water relationships in arid and semi-arid conditions // Arid Zone Res., 1960, vol. 15, p. 37-61.
Gifi A. Nonlinear Multivariate Analysis, Wiley, 1990.
Henry J.L., Bullock P.R., Hogg T.J., Luba D. Groundwater discharge from glacial and bedrock aquifers as a soil salinization factor in Saskatchewan // Canad. J. Soil Sci., 1985, vol. 65, p. 749-768.
Herke S., Mihályfalvy I., Prettenhoffer I., Tury E., Vezekényi E. Agriculture on our (Hungarian) salt-affected soils. Mezõgazdasági Kiadó, 1959. (In Hungarian)
Kellog C.E. Morphology and genesis of the solonetz soils of western North Dakota // Soil Sci., 1934, vol. 38, p. 483-501.
Kovács G. The relationship of salinization and groundwater // Hidrológiai Közlöny, 1960, p. 131-139. (in Hungarian)
Kreybig L., Endrédy A. Über die Abhängigkeit des Vorkommens von Alkaliböden im Oberen Tisza-Gebiete Ungarns von der absoluten Höhenlage // Transact. III. Intern. Congress Soil Sci., Oxford, 1935, v. I, p. 357-360.
Kuti L. Young unconsolidated sediments and their chemical interaction with the groundwater stored in them // Annual Report of the Hungarian Geological Institute of 1987, 1989, p. 441-454. (in Hungarian)
Mados L. Soil salinization and water // Hidrológiai Közlöny, 1943, vol. 23, p. 3-21. (in Hungarian)
McClelland, Mogen C.A., Johnson W.M., Schroer F.W., Allen J.S. Chernozems and associated soils of eastern North Dakota: some properties and topographic relationships // Soil Sci. Soc Amer. Proc., 1959, vol. 23, p. 51-56.
Methodological Publications. Chemical Analyses. Geological Institute of Hungary, 1973. (in Hungarian)
Rónai A. Map of the groundwaters of the Great Hungarian Plain. MÁFI. Budapest, 1961. (in Hungarian)
Rónai A. The geological atlas of the Great Hungarian Plain. Volume Tiszafüred. Geological Institute of Hungary. Budapest, 1975. (in Hungarian)
Scherf E. Geologische und morphologische Verhältnisse des Pleistozäns und Holozäns der grossen ungarischen Tiefebene und ihre Beziehungen zur Bodenbildung, insbesondere der Alkalibodenentstehung // Relationes Annuae Inst. Regii Hungarici Geol. Pro., 1925-28, p. 1-37.
Shannon C.E. A mathematical system of communication. Bell System of Techn. Journal, 1948.
Sigmond de A. Hungarian alkali soils and methods of their reclamation. University of California. Berkeley, 1927.

Somogyi S. (ed.) Cadaster of the microregions of Hungary. Hungarian Academy of Sciences. Budapest, 1991. (in Hungarian)
S-PLUS, Ver. 3.3. 1994. Seattle, StatSci, a division of MathSoft, Inc.
SPSS Categories.1996. Statistical Association Vol. 80. 580-619.
Szabolcs I. Salt-affected soils in Europe. Martinus Nijhoff, the Hague, 1974.
Szendrei G. Soil mineralogy. Magyar Állami Földtani Intézet, 1989.
Tickel S.J. Mapping dryland-salinity harurd, Northen Territory, Australia // Hydrogeology journal, 1997, vol. 5, p. 109-117.
Timpson M.E., Richardson J.L. Ionic composition and distribution in saline seeps of southwestern North Dakota, USA // Geoderma, 1986, vol. 37, p. 295-305.
Tóth J. The role of regional gravity flow in the chemical and thermal evolution of groundwater // Proceedings First Canadian/American Conference on Hydrogeology. Banff, Canada, 1984, p. 3-39.
Tóth T., Blaskó L. Secondary salinization due to irrigation // A. Rodriguez Rodriguez, C.C. Jiménez Mendoza, M.L. Tejedor Salguero (eds.) The soil as a strategic resource. Geoforma Ediciones. Logroňo, Spain, 1998.
Tóth T., Kertész M., Pásztor L. Mapping of salt-affected soils // CD ROM of the Proc. 16th Int. Congress Soil Sci., Montpellier, 1998.
Tóth T., Kuti L., Kabos S., Pásztor L. Use of digitalized hydrogeological maps for evaluation of salt-affected soils of large areas // Arid Land Research and Management, 2001, vol. 15, p. 329-346.
Tóth T., Kabos S., Pásztor L., Kuti L. Statistical prediction of the presence of salt-affected soils by using digitalized hydrogeological maps // Arid Land Research and Management, 2002, vol. 16, p. 55-68.
Treitz P. The natural history of saline and alkali soils. Stadium, Budapest, 1924. (in Hungarian)
Treitz P. Saline and alkali soils of Rump Hungary // E. Sajó, and Á. Trummer (eds.) The Hungarian salt-affected soils. Patria, Budapest, 1934. p. 176-206. (in Hungarian)
Várallyay Gy. Salt accumulation processes in the soils of the Danube valley // Agrokémia és Talajtan, 1967, vol. 16, p. 327-350. (in Hungarian)
Várallyay Gy. Salt accumulation processes in the Hungarian Danube Valley // 9th Int. Congress Soil Sci. Transactions, 1968, p.371-380.
Venables W.N., Ripley B.D. Modern applied statistics with S-Plus, (corrected third printing) Springer, New York, 1996.
Wei Y.Q., Liu S.Y. The gradation and regionalization methods on prediction of potential salinization in Huang-Huai-Hai Plain of China // Proc. Intl Symp. Solonetz Soils. Osijek, 1988, p. 348-353.