

Моделирование как прогноз трансформации почв при техногенном засолении

© 2023. П. Ш. Сайранова, м. н. с., Е. А. Хайрулина, д. г. н., в. н. с.,
Н. В. Митракова, к. б. н., с. н. с., Н. В. Порошина, к. х. н., с. н. с.,
Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4,
e-mail: sairanova.p@gmail.com

Проблема засоления почв является актуальной не только для сельскохозяйственных территорий, но и при добыче полезных ископаемых, в местах поступления рассолов на поверхность в виде пластовых вод или стоков со шламохранилищ и солеотвалов горнодобывающих предприятий. В настоящее время мало проработана оценка и отсутствует нормативное обеспечение (ПДК, ОДК) оценки техногенного засоления почв. Целью статьи является разработка математической модели для прогноза трансформации почв, подверженных техногенному засолению. Объектами исследования были почвы трёх типов ландшафтов: элювиальных, транзитных и аллювиальных, находящихся в зоне техногенного засоления. Для разработки модели использовали информационно-логический анализ и почвенные показатели, которые определяли стандартными методами. Информационно-логический анализ показал, что наибольшее влияние на засоление оказывает коэффициент адсорбции натрия, далее по убыванию: содержание ионов кальция, сульфат-ионов в водной вытяжке почвы, расчётный показатель – ΔpH и pH солевой вытяжки. Модель показала, что наибольшая сумма токсичных солей проявляется при pH_{KCl} 5,3–7,4, при содержании сульфат-ионов больше 500 мг/кг, при содержании Ca^{2+} больше 1000 мг/кг и при SAR больше 10, а при ΔpH меньше 0,5. Данные значения показателей соответствуют аллювиальным почвам долин малых рек, они наиболее подвержены трансформации почв. С помощью полученной информационно-логической модели и почвенных показателей возможно составление прогноза трансформации почв при техногенном засолении.

Ключевые слова: информационно-логический анализ, техногенное засоление, моделирование, прогноз засоления почв.

Modeling as a tool for soil transformation forecasting under technogenic salinization

© 2023. P. Sh. Sairanova ORCID: 0000-0003-4121-0859, E. A. Khayrulina ORCID: 0000-0002-9074-8551,
N. V. Mitrakova ORCID: 0000-0002-3172-4146, N. V. Poroshina ORCID: 0000-0002-1761-6720
Perm State National Research University,
4, Genkelya St., Perm, Russia, 614990,
e-mail: sairanova.p@gmail.com

The problem of soil salinization is relevant not only for agricultural areas but also for mining, where brines enter the surface as formation water or runoff from sludge storage facilities and salt dumps of mining enterprises. Currently, there is little elaboration of assessment and lack of normative support (MPC, APC) for assessment of technogenic salinisation of soils. The aim of this research is to develop a mathematical model for predicting the transformation of soils affected by technogenic salinization. The research focuses on soils in three types of landscapes, namely eluvial, transitional, and alluvial, located in the area of technogenic salinization. To develop the model, information-logical analysis and soil indicators were employed. These indicators were determined by standard methods. According to the information-logical analysis the sodium adsorption coefficient is the dominant factor of soils' salinity; descending further: calcium ion content, sulfates content in the soil water extract and the calculated indicators (ΔpH and pH) of the salt extract. The model showed that the highest amount of toxic salts is observed when pH_{KCl} ranges from 5.3 to 7.4, sulfate content is above 500 mg/kg, calcium content is above 1000 mg/kg, SAR is above 10, and ΔpH is below 0.5. These indicator values correspond to alluvial soils found in small river valleys; these soils are highly prone to transformation. Using the obtained information-logical model and soil indicators, it is possible to make a forecast of soil transformation under technogenic salinization.

Keywords: information-logical analysis, technogenic salinization, modeling, soil salinization forecast.

Поступление на поверхность почвы или близкое залегание грунтовых вод хлоридно-натриевого состава в гумидной зоне с промывным водным режимом приводит к засолению почвы. Источником хлоридно-натриевого засоления грунтовых вод являются естественные выходы NaCl подземных вод [1], буровые растворы [2], изливающиеся разведочные скважины [3] и фильтрационные воды с отходов калийного производства [4, 5]. Подземные воды, перераспределяя накопленные соли в почвенном профиле, обуславливают возникновение солончаковых почв или вторичных солончаков. Засоление почв сопровождается изменением их химических и морфологических свойств, что приводит к смене растительности, снижению биоразнообразия [3, 5, 6]. В северной части Пермского края техногенное засоление почв связано с разработкой полезных ископаемых.

В настоящее время мало проработана оценка техногенного засоления почв. Чаще всего процесс засоления почв рассматривают совместно с исследованием состояния растительного покрова. Установлено, что в районе воздействия содовой промышленности засоление почв связано с уровнем засоленных подземных вод и некоторые виды галофитов могут быть индикаторами уровня почвенного засоления [7].

Отсутствует нормативное обеспечение оценки засоления почв. В настоящее время в России нормативами, в отличие от поверхностных вод, не установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) или ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) солей в почвах [8].

Математическое моделирование почвенных процессов является относительно молодым и активно развивающимся направлением в науке. Традиционно в почвоведении используется системный подход, математическое моделирование особенно эффективно в данной сфере [9]. Оно обладает рядом преимуществ, которые и обуславливают популярность и актуальность данного направления. Первое – процесс может быть изучен до его осуществления (например, моделирование нефтеотмывания [10]), что позволяет спрогнозировать отрицательные последствия до их реального появления. Второе – математическое моделирование позволяет изучать почвенные процессы с учётом не только элементов, но и различных связей между ними [11].

Так, модель ROMUL описывает минерализацию и гумификацию опада и органического

вещества почвы, связанную с этими процессами эмиссию углекислого газа и высвобождение азота в доступных для растений минеральных формах [12]. Модель DAISY (Differential Algebra for Identifiability of SYstems) – это механистическая имитационная модель физических и биологических процессов, применяемая в сельском хозяйстве. Модель может прогнозировать производство, воздействие на окружающую среду в виде выщелачивания и изменение качества почвы (углерода) с течением времени [13]. RothC (Rothamsted Long Term Field Experiments Carbon Model) – это модель круговорота органического углерода в не заболоченном верхнем слое почвы, которая учитывает влияние типа почвы, температуры, влажности почвы и растительного покрова на процесс круговорота [14]. Модель BASFOR (BASic FORest model) используется для анализа рисков, связанных с засухой для хвойных лесов в Европе. Модель работает с ежедневным временным шагом и моделирует динамику запасов углерода, азота и воды в органах деревьев и почве [15].

В последнее время всё шире используется универсальный, не требующий линейности и позволяющий делать логические высказывания между любыми свойствами информационно-логический анализ (ИЛА), который можно использовать для прогнозирования состояний [16]. Метод ИЛА, как и корреляционный анализ, изучает зависимость явления. Однако, кроме тесноты связи, он определяет и форму связи [17]. Основой для ИЛА является метод, опирающийся на теорию информации, где обеспечивается количественная оценка зависимости изучаемого явления от набора входящих в анализ факторов. Здесь определяется мера зависимости, как от каждого фактора, так и от совместного их действия. Поэтому есть возможность выделить главные и второстепенные факторы [18, 19].

Метод ИЛА успешно применяется в различных областях знаний. С его помощью может быть установлена степень влияния разных показателей на формирование профиля почв [20], выявлены закономерности в дифференциации почвенного покрова [21], установлены формы связи между урожайностью культуры и типом почвы [22], найдены взаимосвязи производственного потенциала и экономической эффективности сельскохозяйственных организаций [23] и многое другое.

Для территории, находящейся непосредственно в зоне засоления в связи с деятельностью с горнодобывающей промышленности

к числу наиболее актуальных исследований можно отнести исследование взаимосвязи почвенных показателей и степени засоления почв.

Целью работы является разработка информационно-логической модели для прогноза трансформации почв, находящихся в зоне техногенного засоления.

Объекты и методы исследования

Образцы почв отбирали в полевые периоды 2019–2022 гг. на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) в разных типах ландшафта: аллювиальный (пойма), транзитный, элювиальный (водораздел). Пробы отобраны на природной и антропогенно-изменённой (промплощадки, места складирования отходов калийного производства) территории. Исследованные почвы согласно [24] представлены серогумусовыми, дерново-подзолистыми, подзолами, аллювиальными и техногенно-поверхностными образованиями. В естественных почвах пробы отобраны по двум верхним горизонтам, в техногенных – по слоям.

Для проведения анализа было взято 167 почвенных проб, в которых определили состав водной вытяжки: количество сульфат-ионов определяли турбидиметрическим методом по ГОСТ 26426-85; Ca^{2+} – комплексометрическим методом (ГОСТ 26428-85), обменную кислотность $\text{pH}_{\text{КСл}}$ – потенциометрическим методом по ГОСТ 26483-85, рассчитали коэффициент адсорбции натрия (SAR), сумму токсичных солей ($\Sigma\text{тс}$) и расчётный показатель – $\Delta\text{рН}$. Для математической обработки результатов и моделирования засоления почвы методом ИЛА использовали программу, разработанную учёными кафедры почвоведения и агрохимии Алтайского государственного аграрного университета под руководством профессора Л.М. Бурлаковой [25].

Основными параметрами ИЛА являются коэффициент эффективности передачи информации ($K_{\text{эфф}}$) и показатель специфического состояния. $K_{\text{эфф}}$ оценивает тесноту связи между фактором и явлением. Наиболее достоверны связи с $K_{\text{эфф}} > 0,1$. Ведущим фактором, оказывающим наибольшее влияние, на изучаемое явление, признаётся фактор с наибольшим $K_{\text{эфф}}$. С его помощью можно установить степень влияния каждого фактора на изучаемое явление и расположить их в строгой последовательности относительно друг друга. Специфическое состояние – это ве-

личина условных вероятностей, где наиболее вероятным состоянием является то, для которого отношение условных вероятностей максимально. Так, в каждом ранге фактора можно определить самое максимальное отношение, и оно является самым вероятным [16, 17].

В ИЛА большое значение имеет логический характер связи между параметрами и их положение относительно друг друга. Любая логическая функция обладает для каждого из факторов специфичным каналом связи и общим количеством информации, передающимся от фактора к явлению. На этом основании можно распознать характер взаимодействия факторов. Выделяют четыре логических функции дизъюнкции, конъюнкции, нелинейного произведения, равнозначности [26].

Кратко алгоритм действий ИЛА можно представить в следующем виде:

- 1) определение явления и количественных или качественных факторов (параметров);
- 2) ранжирование исходных данных, то есть распределение на ранги явление и каждый фактор; градацию составляют в зависимости от общепринятых классификаций или относительно равномерного распределения;
- 3) разнос исходных данных по рангам явления и фактора;
- 4) расчёт в программе ИЛА;
- 5) определение специфических состояний явления по факторам; эти пять этапов повторяются для каждого параметра;
- 6) определение характера логической связи между параметрами и положения их относительно друг друга;
- 7) составление модели и расчёт её работоспособности.

Результаты и обсуждение

Основным негативным эффектом от деятельности предприятий по добыче калийных солей является засоление почв. Засоление почвы обусловлено жидкими и твёрдыми отходами, образуемыми при добыче и переработке шламов на калийных предприятиях и складированными на дневной поверхности в шламохранилищах, солетовалах и рассолосборниках [27, 28]. Поэтому в качестве критерия «явление» был выбран показатель – сумма токсичных солей ($\Sigma\text{тс}$). Явление ранжировали согласно степени засоления почв: незасоленные $< 0,15\%$; слабозасоленные $0,15–0,3\%$; средnezасоленные $0,3–0,6\%$; сильнозасоленные $0,6–1,4\%$; очень сильнозасоленные $> 1,4\%$ [29, 30].

Засоление территории рассматривали с разными видами почвенных показателей: анализ водной вытяжки почв (содержание кальция и сульфатов в водной вытяжке почвы), кислотности почвы (обменная кислотность – рН солевой вытяжки), расчётными показателями (коэффициент адсорбции натрия – SAR, разность между рН водной и солевой вытяжки – ΔрН) и расположение в пространстве (глубина отбора почвенных образцов и тип ландшафта).

Метод ИЛА пространственного расположения показал, что связь между явлением и факторами слабая ($K_{эфф.} < 0,08$). Эти факторы нельзя включать в модель, но распределение специфических состояний получилось логичным. В точках отбора высокое накопление солей характерно в нижнем горизонте и в аллювиальном типе ландшафта. Верхний почвенный горизонт и транзитный и элювиальный типы ландшафтов предрасположены к меньшему засолению – 0,30–0,60% и <0,15%. Такое распределение точек отбора почвы по катене имеет отклик во всех факторах, которые рассматривали в ИЛА.

Анализ специфических состояний засоления в зависимости от рН солевой вытяжки показал, что с повышением рН_{KCl} увеличивается засоление. Кислое значение рН солевой вытяжки обнаружено в лесных почвах водораз-

делов и сумма токсичных солей там минимальная, при рН_{KCl} < 4 специфичное состояние суммы токсичных солей < 0,15 (табл. 1). Нейтральное значение рН отмечено в аллювиальных почвах и в местах складирования отходов (возле солеотвалов и шламохранилищ), где происходит нейтрализация почв вследствие действия на них нейтральных солей – NaCl, KCl.

Для наглядности специфичные состояния засоления в зависимости от рН_{KCl} можно представить графически (рис. 1).

Аналогичные операции проводятся для остальных выбранных показателей. Для выделения натриевых почв и для обнаружения процесса осолонцевания использован коэффициент адсорбции натрия (SAR), который также может быть применён как альтернатива доле обменного натрия от ёмкости катионного обмена. Коэффициент SAR выражается отношением концентрации ионов натрия к квадратичному корню суммы ионов кальция и магния [31].

Ещё одним выбранным фактором является показатель ΔрН, разница между рН водной и рН солевой вытяжки. Этот показатель по своему характеризует определяемое ионообменными свойствами почвы распределение «легкообменного» иона водорода между её твёрдой фазой и раствором водной вытяжки. Совокупность обеих величин содержит более

Таблица 1 / Table 1

Распределение экспериментальных данных в ИЛА
Distribution of experiment data in information-logical ana

Фактор Factor	Явление – сумма токсичных солей Phenomenon – the sum of toxic salts					n(b)
	1 ранг 1st rank	2 ранг 2nd rank	3 ранг 3rd rank	4 ранг 4th rank	5 ранг 5th rank	
рН _{KCl}	< 0,15	0,15–0,30	0,30–0,60	0,60–1,40	> 1,40	
< 4	2,400*	0	0,927	0,268	0,124	22
4,1–4,5	1,963*	1,263	0,507	0,292	0,407	22
4,6–5,2	0,768	1,853	2,230*	0,428	0,995	15
5,3–6,4	0,665	0	1,286	0,741	1,606*	26
6,5–7,4	0,602	0,971	0,517	1,200	1,458*	43
> 7,5	0,311	1,878	1,205	2,082*	0,967	37
n(a)	58	12	15	26	56	N = 167
H(A) = 2,061, H(B) = 2,503, T = 0,316, K _{эфф.} = 0,126						

Примечание: * – специфичные состояния явления в зависимости от фактора; n(a) – количество случаев появления в ранге явления; n(b) – количество случаев появления в ранге фактора; N – общее число наблюдений; H(A) – неопределённость по состоянию явления, бит; H(B) – неопределённость по состоянию фактора, бит; T – количество информации, поступающей от фактора к явлению, бит; K_{эфф.} – коэффициент эффективности передачи информации.

Note: * – specific states of the phenomenon depending on the factor; n(a) – number of occurrences in the rank of the phenomenon; n(b) – number of occurrences in the rank of the factor; N – total number of observations; H(A) – uncertainty in the state of the phenomenon, bits; H(B) – uncertainty in the state of the factor, bits; T – amount of information coming from a factor to a phenomenon, bits; K_{эфф.} – coefficient of efficiency of information transfer.

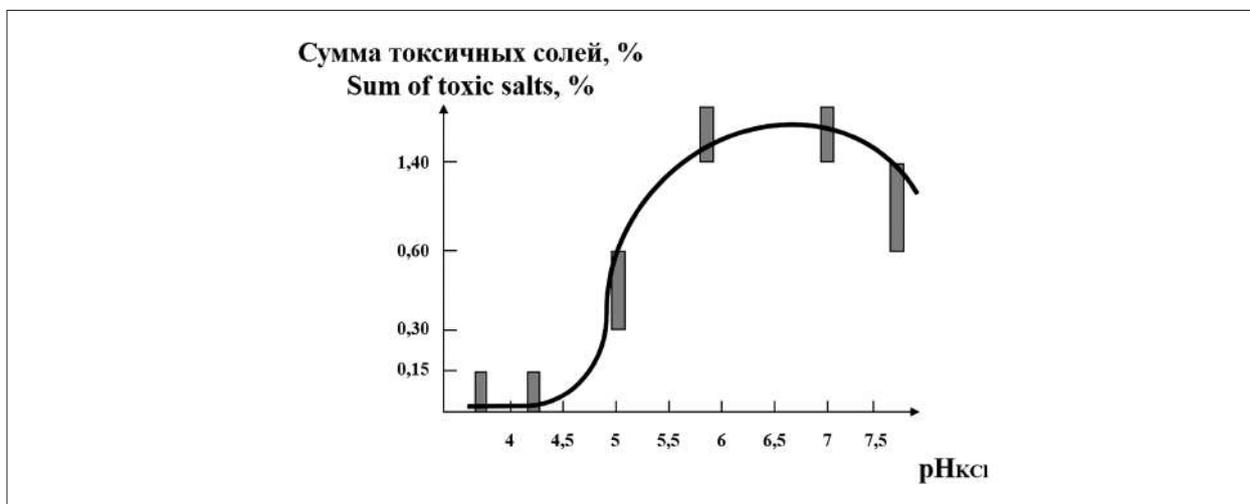


Рис. 1. Специфические состояния засоления территории в зависимости от pH солевой вытяжки почв
 Fig. 1. Specific states of the area salinization depending on the pH of the soil saline extract

полную информацию о состоянии иона водорода в почве, как двухфазной системе, чем каждая из них в отдельности [32].

Для построения количественной модели засоления так же взяли содержание ионов кальция и сульфат-ионов в водной вытяжке почвы. Содержания ионов в водной вытяжке почв распределили исходя из имеющихся результатов так, чтобы примерно во всех рангах были точки. Другие катионы и анионы имеют сильную связь с суммой токсичных солей: чем больше сумма токсичных солей, тем больше содержание катионов и анионов в водной вытяжке. Это делает распределение неравномерным, что может исказить будущую модель. Их сложно равномерно распределить по рангам явления, а для ИЛА это важно.

В итоге по каждому фактору получено специфичное состояние засоления, то есть можно спрогнозировать, какое будет засоление при определённом содержании в почве того или иного показателя (рис. 2). Так, наибольшая сумма токсичных солей проявляется, когда содержание кальция превышает 1000 мг/кг, содержание сульфатов превышает 500 мг/кг, а коэффициент адсорбции натрия больше 10. У расчётного показателя ΔpH обратная зависимость, pH солевой вытяжки в засоленных почвах практически не отличается от pH водной вытяжки, от этого наибольшая сумма токсичных солей проявляется при наименьшем значении ΔpH .

При помощи коэффициента передачи информации ($K_{эфф.}$) установили степень влияния каждого фактора на изучаемое явление и расположили их в строгой последовательности относительно друг друга. Самое большое

влияние на засоление имеет коэффициент адсорбции натрия ($K_{эфф.} = 0,44$). Далее идут катионы и анионы водной вытяжки – $K_{эфф.} Ca^{2+}$ и SO_4^{2-} (0,25 и 0,22, соответственно). Меньшее влияние оказывают показатели кислотности – ΔpH и pH_{KCl} (0,14 и 0,13, соответственно).

Анализ значений коэффициентов связи позволил установить, какие из факторов наиболее сильно (или наиболее слабо) действуют на данные характеристики и определил характер связи – логическая функция нелинейного произведения. Каналы связи интегрировали в статистическую модель:

$$\sum_{Tc} = SAR \times Ca^{2+} \times SO_4^{2-} \times \Delta pH \times pH_{KCl},$$

где \sum_{Tc} – засоление почвы, т.е. ранг явления, суммы токсичных солей; SAR , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , ΔpH , pH_{KCl} – факторы; \times – знак логической операции функции нелинейного произведения.

Статистическую модель можно преобразовать в таблицу специфичных состояний (табл. 2).

Из таблицы 2 видно, что периферийные значения засоления почвы (незасоленные, сильнозасоленные, очень сильнозасоленные) легче выявить, чем срединные значения от 0,15 до 0,60%. Критические показатели (меньше/больше) сразу выдают аномальность значений, в случае очень сильнозасоленных почв.

Последний этап ИЛА – определить эффективность прогноза построенной модели. С помощью критерия Пирсона установлено, что все зависимости между факторами и функцией модели существенны. Для расчёта прогнозируемой работоспособности модели срав-

нивали процентное соотношение фактического ранга явления с расчётным рангом. Для этого хаотично было выбрано 30 разных явлений (100%), в 18 явлениях расчётный показатель совпал с фактическим – ранг в ранг, в 11 случаях – отличался от фактического на один ранг и только в одном случае расчётный показатель отличался от фактического на 2 ранга. Вывод такой: модель даёт безошибочный прогноз в 60%, с ошибкой в 1 ранг в 97%.

Заключение

Информационный анализ экспериментальных данных свидетельствует о различной значимости почвенных показателей в засолении почв. Наибольшее влияние на засоление оказывает коэффициент адсорбции натрия, далее по убыванию содержание кальция и сульфатов в водной вытяжке почвы, ΔрН и рН солевой вытяжки.

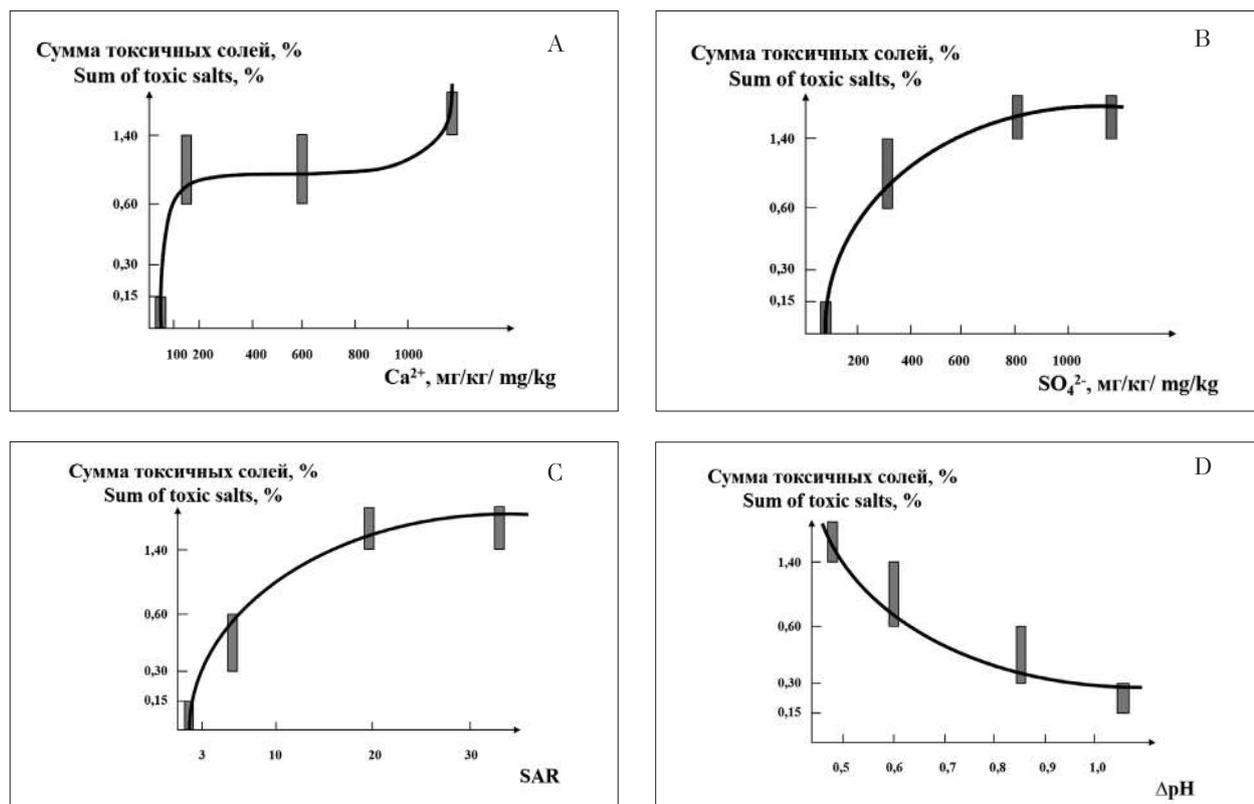


Рис. 2. Специфические состояния засоления территории в зависимости от А – содержания кальция в водной вытяжке, В – содержания сульфатов в водной вытяжке почвы, С – коэффициента адсорбции натрия, D – ΔрН
Fig. 2. Specific states of the area salinization depending on А – the calcium content in the soil water extract, В – the sulfates content in the soil water extract, С – the sodium adsorption coefficient, D – ΔрН

Таблица 2 / Table 2

Специфические состояния засоления территории для каждого фактора
 Specific states of the area salinization for each factor

Σтс, % Σts, %	Ранг явления Rank of phenomenon	SAR	Ca ²⁺ , мг/кг mg/kg	SO ₄ ²⁻ , мг/кг mg/kg	ΔрН	рН _{KCl} , ед. рН pH value
< 0,15	1	< 3	< 100	< 200	–*	< 4,5
0,15–0,30	2	–	–	–	>1,0	–
0,30–0,60	3	3–10	–	–	0,7–1,0	4,6–5,2
0,60–1,40	4	–	100–1000	200–500	0,5–0,7	> 7,5
> 1,40	5	> 10	> 1000	> 500	< 0,5	5,3–7,4

Примечание: * – прочерки обозначают, что для ранга явления отсутствует специфическое состояние по этому фактору, распределение идёт в другие ранги.

Note: * – dashes indicate that there is no specific state for the rank of the phenomenon to this factor, the distribution goes to other ranks.

Максимальное засоление характерно для почв, расположенных в аллювиальном типе ландшафта. Транзитный и элювиальный типы ландшафтов предрасположены к меньшему засолению – 0,30–0,60% и < 0,15%, соответственно.

Применённый метод информационно-логического анализа для данного объекта исследования показал между явлением и рассмотренными факторами наличие связей и возможностей прогнозирования. В дальнейшем модель можно применять для прогноза степени засоления почвы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект FSNF-2020-0021.

Авторский коллектив выражает благодарность профессору, доктору сельскохозяйственных наук, Е.Г. Пивоваровой за консультации в работе с информационно-логическим анализом.

Литература

1. Хайрулина Е.А., Новосёлова Л.В., Порошина Н.В. Природные и антропогенные источники водорастворимых солей на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Географический вестник. 2017. № 1. С. 93–101.
2. Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т., Трофимов С.Я. Характеристика техногеохимических аномалий торфяных почв, загрязнённых шламами в районе нефтедобычи в Среднем Приобье // Агрохимия. 2012. № 11. С. 82–90.
3. Сванидзе И.Г., Моисеенко Т.И., Якимов А.С., Соромотин А.В. Воздействие техногенного галогенеза на водосборные ландшафты речных долин и водные системы (на примере юга Тюменской области) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 94–103.
4. Батурин Е.Н., Меньшикова Е.А., Блинов С.М., Наумов Д.Ю., Белкин П.А. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6 [Электронный ресурс] <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7513&ysclid=lo44n8xz2c955874412> (Дата обращения: 17.05.2023).
5. Ерёмченко О.З., Митракова Н.В., Шестаков И.Е. Природно-техногенная организация почвенного покрова территории воздействия солеотвалов и шламохранилищ в Соликамско-Березниковском экономическом районе // Вестник Пермского университета. Серия Биология. 2017. Вып. 3. С. 311–320.
6. Симонова Ю.В., Русаков А.В., Рюмин А.Г. Засоленные почвы Ростовской низины (Ярославская область): морфология, генезис и динамика засоления в годовом гидрологическом цикле // Бюллетень Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Т. 93. С. 40–74.
7. Hulisz P., Piernik A. Soil affected by soda industry in Inowrocław // Technogenic soils of Poland. Toruń: Polish Society of Soil Science, 2013. P. 125–140.
8. Хайрулина Е.А. Ландшафтообразование в условиях техногенного галогенеза / Е.А. Хайрулина: автореф. дисс. ... докт. геогр. наук. Томск, 2022. 43 с.
9. Михайлов Ф. Моделирование некоторых почвенных процессов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 7 (117). С. 59–64.
10. Куюкина М.С., Ившина И.Б., Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Коростина О.А. Модель нефтеотмывания загрязнённого почвогрунта под действием *Rhodococcus*-биосурфактанта // Российский журнал биомеханики. 2006. Т. 10. № 1. С. 59–67.
11. Роговая О.Г. Экологическое моделирование. СПб.: ООО «Книжный Дом», 2007. 104 с.
12. Чертов О.Г., Комаров А.С., Надпорожская М.А., Михайлов А.В., Быховец С.С., Зудин С.Л., Зубкова Е.В. Динамическое моделирование процессов трансформации органического вещества почв. Имитационная модель ROMUL / Науч. ред. Б.Ф. Апарин. СПб.: Издательство СПбГУ, 2007. 96 с.
13. Hansen S., Abrahamsen P., Petersen C.T., Styczen M. Daisy: Model use, calibration and validation // Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2012. V. 55. No. 4. P. 1315–1333.
14. Coleman K., Jenkinson D.S., Crocker G.J., Grace P.R., Klír J., Körschens M., Poulton P.R., Richter D.D. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3 // Geoderma. 1997. V. 81. No. 1–2. P. 29–44.
15. van Oijen M., Beer C., Cramer W., Rammig A., Reichstein M., Rolinski S., Seneviratne S., Soussana J.-F. A novel probabilistic risk analysis to determine the vulnerability of ecosystems to extreme climatic events // Environmental Research Letters. 2013. No. 8. Article No. 015032. doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015032
16. Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В. Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Итоги науки. Медицинская география. Вып. 3. М.: ВИНТИ, 1969. С. 5–74.
17. Пузаченко Ю.Г., Карпачевский Л.О., Взнуздаев Н.А. Возможности применения информационно-логического анализа при изучении почвы на примере её влажности. Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. М.: Наука, 1970. С. 103–121.
18. Панкова Т.И., Масютенко Н.П., Колтышева Е.В. Возможности моделирования плодородия почв на основе информационно-логического анализа // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 4. С. 8–16.
19. Математическое моделирование в классификации почвенных систем / Ред. Г.Г. Морковкин. Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2020. 71 с.

20. Сайранова П.Ш., Самофалова И.А. Кислотно-основные свойства горных почв на северном и среднем Урале // Антропогенная трансформация природной среды. 2018. № 4. С. 94–97.

21. Самофалова И.А. Информационно-логический анализ дифференциации почвенного покрова высотных геосистем на среднем Урале // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 11 (157). С. 105–114.

22. Пивоварова Е.Г., Люцигер А.О., Усенко С.В., Гаркуша А.А. Разработка частной модели управления плодородием чернозёмных почв в условиях климатических изменений Алтайского Приобья // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 11 (97). С. 34–38.

23. Хэ Н.Ю., Миненко А.В. Информационно-логический анализ в исследовании взаимосвязи производственного потенциала и экономической эффективности сельхозорганизаций // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011. № 5 (79). С. 108–113.

24. Классификация и диагностика почв России / Ред. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

25. Программа информационно-логического анализа, разработанная учёными кафедры почвоведения и агрохимии Алтайского государственного аграрного университета под руководством профессора Л.М. Бурлаковой [Электронный ресурс] <https://www.asau.ru/ru/2015-03-26-04-56-50/aktualnye-nauchno-issledovatel'skie-razrabotki> (Дата обращения: 01.09.2023).

26. Бурлакова Л.М. Комплексы параметров различных уровней почвенного плодородия и пути его управления в системе земледелия в Алтайском крае // Проблемы регионального природопользования и охраны окружающей среды в Алтайском крае в свете решений XXVI съезда КПСС: тезисы докладов научно-практической конференции. Барнаул, 1983. С. 92–96.

27. Karavaeva T., Menshikova E., Belkin P., Zhdakaev V. Features of arsenic distribution in the soils of potash mines // Minerals. 2022. No. 12. Article No. 1029.

28. Хайрулина Е.А. Техногенная трансформация ландшафтно-геохимических процессов в районе добычи калийно-магниевых солей // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 41–45.

29. Базилевич Н.И., Панкова Е.И. Опыт классификации почв по засолению // Почвоведение. 1968. № 11. С. 3–16.

30. Панкова Е.И., Ямнова И.А. О диагностике солончаков // Почвоведение. 1993. № 10. С. 28–38.

31. Procedures for soil analysis / Ed. L.P. van Reeuwijk. Wageningen: ISRIC, 2002. 119 p.

32. Кокотов Ю.А., Сухачёва Е.Ю., Апарин Б.Ф. Поле кислотности, как ионообменных систем, и диагностика генетических горизонтов // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1448–1459.

References

1. Khayrulina E.A., Novoselova L.V., Poroshina N.V. Natural and anthropogenic sources of soluble salts on the territory of the Upper Kama potash deposit // Geographical Bulletin. 2017. No. 1. P. 93–101 (in Russian). doi: 10.17072/2079-7877-2017-1-93-101

2. Vodyanitskii Yu.N., Avetov N.A., Savichev A.T., Trofimov S.Ya. Characterization of technogeochemical anomalies in peat soils contaminated with slimes in the oil production areas of the Central Ob region // Agrochemistry. 2012. No. 11. P. 82–90 (in Russian).

3. Svanidze I.G., Moiseenko T.I., Yakimov A.S., Soromotin A.V. Impact of technogenic halogenesis on water catchment landscapes of river valleys and water systems: case study of the south of Tyumen province // Water Resources. 2014. V. 41. No. 1. P. 94–103 (in Russian). doi: 10.7868/S0321059614010118

4. Baturin E.N., Menshikova E.A., Blinov S.M., Naumov D.Yu., Belkin P.A. Problems of the development of the world largest potassium deposits // Modern problems of science and education. 2012. No. 6 [Internet resource] <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7513&ysclid=lo44n8xz2c955874412> (Accessed: 17.05.2023) (in Russian).

5. Eremchenko O.Z., Mitrakova N.V., Shestakov I.E. Natural and technological organization of a soil cover of the area of influence of the saltdumps and sludge in the Solikamsk-Berezniki economic area // Bulletin of Perm University. Biology series. 2017. V. 3. P. 311–320 (in Russian).

6. Simonova Yu.V., Rusakov A.V., Ryumin A.G. Salt-affected soils of the Rostov lowland (Yaroslavl' region): morphology, genesis and dynamics of salinization in the annual hydrological cycle // Dokuchaev Soil Bulletin. 2018. V. 93. P. 40–74 (in Russian). doi: 10.19047/0136-1694-2018-93-40-74

7. Hulisz P., Piernik A. Soil affected by soda industry in Inowrocław // Technogenic soils of Poland. Toruń: Polish Society of Soil Science, 2013. P. 125–140.

8. Khairulina E.A. Landscape formation under conditions of technogenic halogenesis / E.A. Khairulina: abstract. diss ... doc. geogr. sci. Tomsk, 2022. 43 p. (in Russian).

9. Mikailov F. Modeling of some soil processes // Bulletin of the Altai State Agricultural University. 2014. V. 7. No. 117. P. 59–64 (in Russian).

10. Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Osipenko M.A., Nyashin Yu.I., Korostina O.A. Model of oil laundering of contaminated soil under the influence of *Rhodococcus* biosurfactant // Russian Journal of Biomechanics. 2006. V. 10. No. 1. P. 59–67 (in Russian).

11. Rogovaya O.G. Ecological modeling. Sankt-Peterburg: Book House, 2007. 104 p. (in Russian).

12. Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudin S.L., Zubkova E.V.

- Dynamic modeling of soil organic matter transformation processes. Simulation model ROMUL / Ed. B.F. Aparin. Sankt-Peterburg: SPbU Publishing House, 2007. 96 p. (in Russian).
13. Hansen S., Abrahamsen P., Petersen C.T., Styczen M. Daisy: Model use, calibration and validation // Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2012. V. 55. No. 4. P. 1315–1333.
 14. Coleman K., Jenkinson D.S., Crocker G.J., Grace P.R., Klir J., Körschens M., Poulton P.R., Richter D.D. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3 // Geoderma. 1997. V. 81. No. 1–2. P. 29–44. doi: 10.1016/S0016-7061(97)00079-7
 15. Van Oijen M., Beer C., Cramer W., Rammig A., Reichstein M., Rolinski S., Soussana J.-F. A novel probabilistic risk analysis to determine the vulnerability of ecosystems to extreme climatic events // Environmental Research Letters. 2013. No. 8. Article No. 015032. doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015032
 16. Puzachenko Yu.G., Moshkin A.V. Information and logical analysis in medical and geographical research // Science outcomes. Medical geography. No. 3. Moskva: VINITI, 1969. P. 5–74 (in Russian).
 17. Puzachenko Yu.G., Karpachevsky L.O., Vznuzdaev N.A. Possibilities of using information and logical analysis when studying soil using the example of its moisture content. Patterns of spatial variation in soil properties and information and statistical methods for their study. Moskva: Nauka, 1970. P. 103–121 (in Russian).
 18. Pankova T.I., Masyutenko N.P., Koltysheva E.V. Opportunities of soil fertility modelling on the basis of information-logic analysis // Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2018. No. 4. P. 8–16 (in Russian).
 19. Mathematical modeling in the classification of soil systems / Ed. G.G. Morkovkin. Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2020. 71 p. (in Russian).
 20. Sairanova P.Sh., Samofalova I.A. Acid-basic properties of mountain soils in the North and Middle Urals // Anthropogenic transformation of the natural environment. 2018. No. 4. P. 94–97 (in Russian).
 21. Samofalova I.A. Information-logical analysis of soil cover differentiation of the altitude geosystems in the Middle Urals // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2017. No. 11 (157). P. 105–114 (in Russian).
 22. Pivovarova E.G., Luetziger A.O., Usenko S.V., Garkusha A.A. Development of a private model of chernozem soil fertility management in conditions of climatic changes in the Altai Ob region // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2012. No. 11 (97). P. 34–38 (in Russian).
 23. He N.Y., Minenko A.V. Information and logical analysis in the study of the relationship between production potential and economic efficiency of agricultural organizations // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2011. V. 5. No. 79. P. 108–113 (in Russian).
 24. Classification and diagnostics of soils in Russia / Eds. L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oykumena, 2004. 342 p. (in Russian).
 25. Information-logical analysis program developed by scientists from the Department of Soil Science and Agrochemistry of the Altai State Agrarian University under the leadership of Professor L.M. Burlakova [Internet resource] <https://www.asau.ru/ru/2015-03-26-04-56-50/aktualnye-nauchno-issledovatel'skie-razrabotki> (Accessed: 09.01.2023).
 26. Burlakova L.M. Complexes of parameters of various levels of soil fertility and ways of its management in the agricultural system in the Altai Territory // Problemy regional'nogo prirodopolzovaniya i okhrany okruzhayushchey sredy v Altayskom krae v svete resheniy XXVI sezdza KPSS: tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii. Barnaul, 1983. P. 92–96 (in Russian).
 27. Karavaeva T., Menshikova E., Belkin P., Zhdakov V. Features of arsenic distribution in the soils of potash mines // Minerals. 2022. V. 12. No. 8. Article No. 1029. doi: 10.3390/min12081029
 28. Khairulina E.A. Technogenic transformation of landscape-geochemical processes in the area of potassium and magnesium salts mining // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 3. P. 41–45 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-041-045
 29. Bazilevich N.I., Pankova E.I. Experience in classifying soils by salinity // Soil Science. 1968. No. 11. P. 3–16 (in Russian).
 30. Pankova E.I., Yamnova I.A. On the diagnostics of solonchaks // Soil Science. 1993. No. 10. P. 28–38 (in Russian).
 31. Procedures for soil analysis / Ed. L.P. van Reeuwijk. Wageningen: ISRIC, 2002. 119 p.
 32. Kokotov Yu.A., Sukhacheva E.Yu., Aparin B.F. Acidity field of soils as ion-exchange systems and the diagnostics of genetic soil horizons // Soil Science. 2014. No. 12. P. 1448–1459 (in Russian).