# НАУКИ О ЗЕМПЕ И ПРИРОДОПОПЬЗОВАНИЕ

**Владимир Романович ЦИБУЛЬСКИЙ**[1]
**Илья Георгиевич СОЛОВЬЁВ**[2]
**Денис Александрович ГОВОРКОВ**[3]

**УДК 631.4**

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ (ОБЗОР)

[1] доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт проблем освоения Севера,
Тюменский научный центр,
Сибирское отделение РАН
v-tsib@yandex.ru

[2] кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
Институт проблем освоения Севера,
Тюменский научный центр,
Сибирское отделение РАН
solovyev@ikz.ru

[3] кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт проблем освоения Севера,
Тюменский научный центр,
Сибирское отделение РАН
dagovorkov@mail.ru

**Цитирование:** Цибульский В. Р. Основные подходы к моделированию устойчивости почв (обзор) / В. Р. Цибульский, И. Г. Соловьёв, Д. А. Говорков // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2017. Том 3. № 4. С. 6-23. DOI: 10.21684/2411-7927-2017-3-4-6-23

**Аннотация**

В статье приведен обзор методов оценки почвенной устойчивости на основе математических моделей системы «почва-фитоценоз». В качестве примера важности таких оценок приведено фрагмент карты почвенной устойчивости из «Национального атласа почв РФ». Под устойчивостью в данном случае понимается способность сохранять свое состояние: состав, структуру при естественном антропогенном воздействии. Даны примеры наиболее распространенных методов и моделей: балльный, индексный, биофизический, термодинамический и физико-химический. В последнем случае рассматривается метод и модель, основанные на теории встреч, на которую в последнее время вновь обратили внимание исследователи, занимающиеся логистическими моделями, сигмоидами. Приведены модели и критерии устойчивости почвенных процессов как в отрыве от биоценозов, так и в комплексе с ними.

Обзор будет интересен и полезен научным сотрудникам, аспирантам и магистрантам соответствующих специальностей. Для специалистов, интересующихся соответствующим программным обеспечением, дана ссылка на обзор по связанной тематике и пакетам программ доступных для применения в исследовательской практике. Обзор в большей степени ориентирован на экосистемную оценку.

**Ключевые слова**

Почва, устойчивость, математические модели, биоценоз, критерии.

**DOI: 10.21684/2411-7927-2017-3-4-6-23**

Промышленное освоение севера Западной Сибири, которое сопровождается масштабными нарушениями природных комплексов, делает крайне актуальной задачу оценки их устойчивости. Проблема устойчивости геосистем, популяций и биомов связана с устойчивостью самовосстановления и формирования почвенного слоя [26-29, 45, 16]. Понимание устойчивости почв является важнейшим условием для объяснения механизмов устойчивости геосистем — систем открытых и саморегулируемых [40].

Под устойчивостью почв к естественным и антропогенным воздействиям понимают способность длительное время сохранять свое состояние (состав, структуру, функционирование, пространственное положение) в условиях относительно небольшого изменения своего исходного состояния после его возмущения [45].

Одним из главных показателей этого состояния является плодородие. Соответственно, устойчивость почв определяется по способности его поддерживать, а критерием устойчивости является стабильность запаса веществ, от которых зависит развитие гумуса, элементов минерального питания, фитобиоты. В расширенном варианте этого подхода устойчивость почв оценивается также по способности поддержания физико-химических характеристик, почвенно-поглощающего комплекса (скелета) и т. д. Другой поход рассматривает почвы с геосистемных позиций как часть ландшафтной оболочки, в которой происходит преобразование и потребление вещества и энергии [40].

Первый подход реализован в «Национальном атласе почв РФ» [44]. В нем для трех типов ландшафта (аккумулятивный, транзитный, элювиальный) применена интегральная балльная оценка следующих параметров: мощность генетических горизонтов, водный pH, ЕКО в гумусовом горизонте, содержание гумуса в слое 0-20 см, гранулометрический состав. В результате суммирования баллов выделено пять классов по степени устойчивости функционирования почв. Характерно, что на севере Западной Сибири к категории «низкой устойчивости» отнесены почвы наиболее возвышенной части — Сибирских увалов. Почвы аккумулятивных ландшафтов морского побережья имеют устойчивость выше, чем почвы, сформировавшиеся в условиях элювиальных водораздельных ландшафтов (рис. 1) [44]. Методологический подход подобных оценок, основанный на разделении элювиальных, транзитных и аккумулятивных ландшафтов, проистекает из положения о зависимости химического состава коры выветривания от геоморфологических условий (Полынов, 1956).

Однако такая оценка не дает ясного представления о механизме достижения и потере почвами устойчивости и о роли биоценоза в этом процессе. Ниже в статье уделено внимание обобщению материалов по моделированию и анализу устойчивости функционирования почв с позиции, в основу которой положено взаимодействие в системе «почва — фитоценоз».

Одним из наиболее широко распространенных подходов к оценке устойчивости почв является анализ параметров круговорота веществ в биогеоценозах, в частности в системе «почва — лес». Почвенно-биотический процесс продуцирования и последующего разложения фитомассы является основой существо-

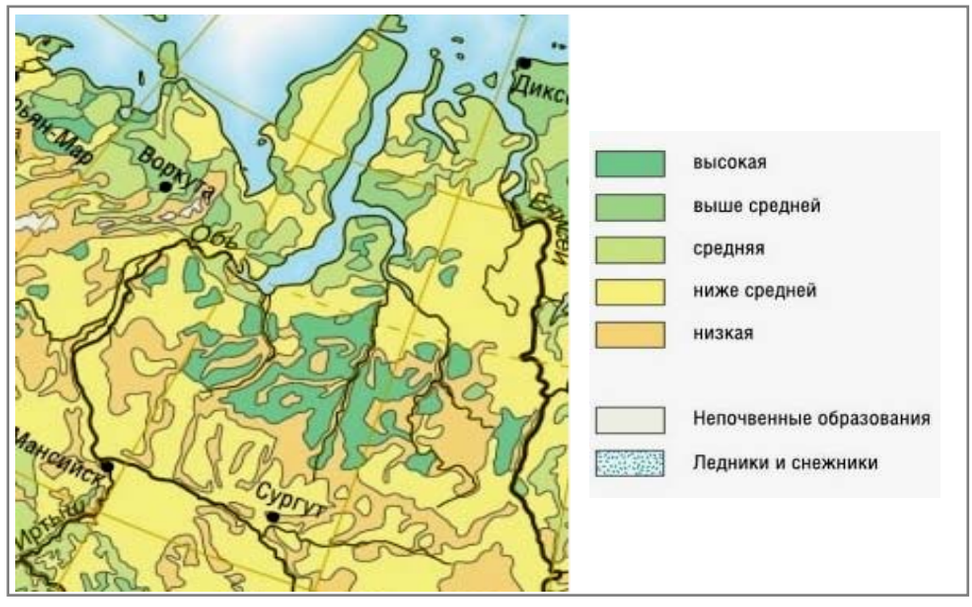


*Рис. 1.* Фрагмент карты устойчивости функционирования почв

*Fig. 1.* The map fragment of soil functional stability

вания и развития лесного биома, от его устойчивости зависит развитие как отдельной лесной популяции, так и всего природного комплекса тайги.

Моделирование системы «биоценоз — почва» разделяется на два направления. Первый основан на анализе годичного процесса, во время которого происходит опад и разложение фитомассы, образование гумуса и потребление его корнями деревьев. Исследования показали, что при гумификации остатков травянистой растительности, листвы и хвои не менее 50-75 % исходной мортмассы минерализуется и сразу используется корневой системой растений [20]. Э. Г. Коломыц и Л. С. Шарая называют такую устойчивость функциональной, а применительно к годичному циклу разложения подстилающей фитомассы и вовлечения высвободившихся элементов в биогеохимический круговорот — лабильной фитоценотической устойчивостью [17]. Не менее важное значение имеют многолетние процессы накопления биологически важных элементов в подстилке и гумусовом горизонте, которые характеризуют инерционную почвенно-биотическую устойчивость [17]. Для оценки данного вида устойчивости авторы вводят традиционные показатели — индексы резистентной и упругой устойчивости. Принятые индексы резистентной и упругой устойчивости определяются как мера отклонения от его максимального состояния. Оба индекса при сбалансированном процессе оборота биомассы стремятся к единице. В случае лабильной устойчивости они определяются следующим образом:

$$I_{i_{упр}}(1) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\Delta kR_i)^2 + (\Delta kY_i)^2}, \qquad (1)$$

где $\Delta kR_i = (kR_{max} - kR_i)/(kR_i - kR_{min})$;
$\Delta kY_i = (kY_i - kY_{min})/(kY_{max} - kY_i)$;
$kR = PV/BL$; $kY = PV/ML$ — коэффициенты годичной деструкции;
$PV$ — годичная продукция зеленой массы;
$BL$ — общая живая наземная фитомасса;
$ML$ — масса лесной подстилки;
$i$ — номер статистической выборки.

Для $I_{рез}(1)$ имеем:
$\Delta kR_i = (kR_i - kR_{min})/(kR_{maxi} - kR_{min})$;
$\Delta kY_i = (kY_{max} - kY_i)/(kY_{max} - kY_{min})$.

Упругая устойчивость применяется при оценке влияния наземной фитомассы, а резистентная — с массой подстилки.

Инерционная почвенно-биотическая устойчивость должна учитывать накопление биогумусной массы HU. Соответствующие индексы записываются в виде [17]:

$$I_{i_{упр}}(2) = 1 - \sqrt{\frac{(1-kR_i)^2 + aML_i^2 + b(1-HU_i)^2}{1+a+b}},$$

$$I_{i_{рез}}(2) = 1 - \sqrt{\frac{kR_i + a(1-ML_i)^2 + bHU_i^2}{1+a+b}},$$

где $a$, $b$ — весовые коэффициенты влияния факторов.

Авторы приводят результаты исследования почвенно-биотической устойчивости для Окско-Волжского бассейна. По ландшафтной группе (763) он наиболее близок к северотаежной подзоне Западной Сибири, норма резистентной устойчивости равна 0,384, упругой — 0,601. В случае Северотаежной зоны уровень упругой устойчивости со значением выше среднего соответствует только пойменным формациям [44].

Особенностями рассмотренного метода являются больший акцент на устойчивости экосистемы, включающей биоценоз и почву, и статистический подход к анализу.

Достаточно распространенным является метод оценки почвенно-биотической устойчивости на основе динамических моделей, в основе которых лежат биофизические законы [2, 6, 19, 25, 29, 43].

Начнем с распространенной модели «Двухвидовый лес — ресурс» [21]. Это модель конкуренции (взаимодействия) «лес — почва». Для удобства приведем схематичный рисунок такого взаимодействия (рис. 2).

Основные показатели взаимодействующих биофизических структур P(t) — показатель плодородия почвы и U(t) — рост биомассы. Модель имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{P} = \sum_i (A_i - V_i)u_i + B(P^0 - P) - W \\ \dot{u}_i = (k_i C_i V_i - D_i)u_i \end{cases}, \; i = \{x, л\};$$

где $P(t)$ — обобщенный показатель плодородия — плотность ресурса (кг/м$^2$);

$u_л$ — плотность биомассы лиственных пород (кг/м$^2$);

$u_x$ — плотность биомассы хвойных пород (кг/м$^2$);

$A_i$ — коэффициент восстановления почвы за счет опада i-й породы (1/год);

$B$ — коэффициент самовосстановления почвы (1/год);

$P^0$ — асимптотическое значение плодородия в отсутствие леса (кг/м$^2$);

$V_i$ — скорость потребления ресурса (трофическая функция) (1/год);

$C_i$ — поправочный множитель, описывающий конкуренцию;

$k_i$ — коэффициент роста $i$-й породы;

$D_i$ — коэффициент естественной смертности деревьев (1/год);

$W_i$ — влияние внешних факторов, чаще пагубное, поэтому с отрицательным знаком, (кг/(год·м$^2$);

$t^0$ — среднее время взросления молодого леса (год);

$i$ может принимать два значения: лиственные (Л) и хвойные (Х) породы.

В случае «этнокультурного леса», т. е. оптимального увлажнения и отсутствия затенения, стационарная плотность ресурса (плодородие почвы) вычисляется через $P = A/V^0$, где $V^0$ — скорость потребления в этой точке, а условие устойчивости определяется неравенством $D_i < k_i A_i$, т. е. невысокой смертностью деревьев.

При помощи данной модели можно получить темпы взросления и отмирания видовой популяции при разных показателях плодородия почв [27; 28; 29].

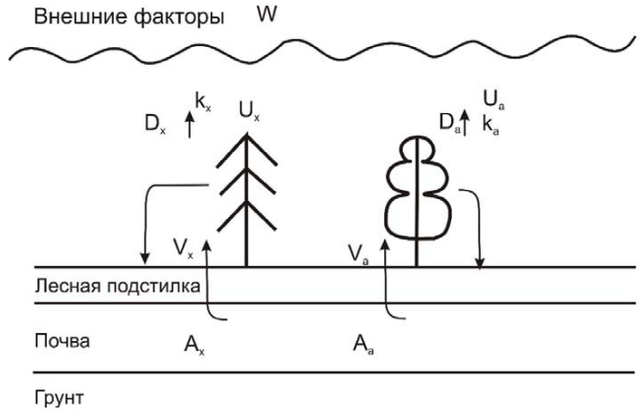


*Рис. 2.* Схема взаимодействия в модели «двухвидовый лес — почва»

*Fig. 2.* Interaction scheme of in “two-type forest — soil” model

К этому же направлению относятся работы факультета почвоведения МГУ [31], в моделях которых задействована нелинейность структурных связей.

Нелинейность появляется в связи с тем, что производство субстрата связано с продуктивностью микроорганизмов в почве, а скорость его потребления — с ростом популяций деревьев. Наиболее распространенной функцией трофических связей является уравнение Михаэлиса — Ментен. Оно отражает тот факт, что рост потребления субстрата небезграничен и имеет три фазы: рост, постоянная величина и спад [30]. В свою очередь, это отражается на росте фитомассы древесной популяции и может привести к скачкообразным изменениям (деградации) в системе «биоценоз — почва». Проводя натурные исследования древесно-кольцевых хронологий (ДКХ) [36, 38], можно воспользоваться упрощенными моделями нелинейных функций роста [30]:

$$dB/dt = rB\left(1-\frac{B}{K}\right),$$
$$dX/dt = kB - \gamma X,$$

где $B$ и $X$ — запасы фитомассы и субстрата,

$r$ — мальтузианский параметр роста фитомассы,

$K$ — емкость среды,

$k$ и $\gamma$ — константы спада и деструкции.

Если устойчивость системы «биоценоз — почва» определяется первым уравнением, то устойчивость формирования органического вещества почвы — вторым, стационарное состояние которой определяется соотношением $\overline{X} = K \cdot k / \gamma$, где $\overline{X}$ — предельное значение $X$.

При усложнении модели путем замыкания обратной связи, т. е. зависимости между ростом плодородия и фитомассы и наоборот (рис. 2), уравнения принимают вид [32]:

$$dB/dt = \frac{r_0 BX}{X+\alpha} - kB - \frac{kB^2}{K},$$
$$dX/dt = k_2 B - \gamma X,$$

где $\gamma_0$ — максимальная скорость роста биомассы,

$\alpha$ — константа Михаэлиса,

$X$ — запасы возобновляемого ресурса,

$k_2$, $\gamma$ — константы поступления опада в почву и его разложения.

Стационарные состояния образования органического вещества определяются двумя парами равенств:

$$\overline{B_1} = 0 \text{ и } \overline{X} = \frac{k_2 \overline{B}}{\gamma};$$
$$\overline{B_2} = \frac{m \pm \sqrt{m^2 - 4KS}}{2} \text{ и } \overline{X} = \frac{k_2 \overline{B}}{\gamma};$$

где $m = \frac{r_0 K}{k} - K - S$, $S = \frac{\alpha\lambda}{k_2}$.

Также устойчивость исследовали ряд авторов, применяя термодинамические модели: Г. Спозито, А. М. Глобус, М. Ф. Давлетшина [9, 11, 32].

Вначале определимся с основными физическими процессами, происходящими в почве рассматриваемых территорий [42]. В почвах северной тайги преобладающими процессами распространения влаги с растворенными в ней питательными веществами являются диффузионные, гравитационные. Причем проходят они в достаточно широком температурном диапазоне от –7°С до +20°С. В этом диапазоне на активацию биологических процессов влияет тот факт, что нижняя граница рассматриваемой системы имеет слой почвы многолетнемерзлый или оттаивающий в летние месяцы.

Кроме того, известно, что при промерзании влагосодержащих грунтов (почв) достаточно сильно меняется гидростатическое давление, образуются бугры пучения и различные деформации [5, 10, 12, 34, 41]. При исследовании почв важна устойчивость миграции влаги и растворенных в ней солей при изменениях температуры и давления [9, 32].

Г. Спозито, рассматривая почву как раствор, дает условия равновесия и устойчивости этого равновесия. Речь идет только о внутрипочвенных процессах, т. е. не учитывается привязка к надземной части фитомассы, и система (термостат) представляет собой некие активные слои почвы, ограниченные поверхностью и слоем нижележащих грунтов.

Следуя Г. Спозито, примем, что образец почвы заключен в диатермическую оболочку или тепловой резервуар. Для такого варианта физической модели самое общее фундаментальное уравнение, описывающее процессы в ней, имеет вид [18, 32]:

$$dU = dU_S + dU_R = T_S dS_S - P_S dV_S + \sum_i \sum_\alpha \mu_{i\alpha S} dm_{i\alpha S} + T_R dS_R - P_R dV_R + \\ + \sum_i \sum_\alpha \mu_{i\alpha R} dm_{i\alpha R},$$

где $S$ и $R$ — индексы почвы и теплового резервуара;

$i$ — номер компоненты;

$\alpha$ — фазы почвы: твердая, жидкая и газообразная;

$U_S$, $U_R$ — внутренняя энергия почвы и резервуара,

$m_i$ — масса $i$-х компонентов почвы;

$T$ — температура;

$P$ — давление;

$V$ — объем;

$\mu_i$, — химический потенциал компонентов.

В соответствии с первым и вторым законами термодинамики условие равновесия $dU = 0$, условие устойчивости $d^2U > 0$, т. е. любые отклонения от первого только положительны.

Для получения более конкретного условия устойчивости системы «почва — вода» Г. Спозито перешел к уравнению для свободной энергии Гиббса, вывел уравнение Эйлера для независимых переменных состояния: $S$ (энтропия), $V$ (объем), $\{m_{i\alpha}\}$ (массы i-х компонентов). Вводя новые независимые переменные, отнесенные к массе скелета почвы $s_1 \equiv S/m_s, v_2 \equiv V/m_s$; $\theta_{\alpha p} = m_\alpha/m_s$, и обозначив их, он получил условие устойчивости системы «почва — вода»:

$$(\partial x_i / \partial P_i)_{P_1 \ldots P_{i-1}, x_{i+1}} > 0 \quad (i = 1, 2, 3, 4),$$

где $P_{ij} = \partial u / \partial x_{ij}$ — интенсивная переменная.

Например, для $i$ = 1 критерий $(\partial s / \partial T)_{v, \Theta_{\alpha 1}} \Theta > 0$, т. е. увеличение тепла должно приводить к повышению температуры при постоянстве остальных переменных.

Для $i$ = 3 и $i$ = 4 условиями устойчивости являются: $(\partial \Theta_\alpha / \partial \mu_\alpha)_{T,P,\Theta} > 0$ и $(\partial \Theta / \partial \mu_w)_{T,P,\Theta_\alpha} > 0$, т. е. изменение массы любого компонента почвы должно сопровождаться ростом ее химического потенциала и наоборот и быть положительным.

Однако это справедливо для более южных почв. На севере пойменные участки соответствуют такому уравнению, но с добавлением слагаемого в правой части, учитывающего «скрытую» теплоту фазового перехода влаги в твердое состояние. Модель, учитывающая этот фактор, описана у А. М. Глобуса [9]:

$$\upsilon_в dP_в - \upsilon_л dP_л = \frac{H_T}{T_0} dT,$$

где $\upsilon_в$ и $\upsilon_л$ — относительные объемы влаги и льда,

$H_T$ — теплота фазового перехода,

$T_0$ — абсолютная температура.

А. М. Глобус считает «центральным понятием термодинамики почвенной влаги» химический потенциал:

$$\mu_в = (\partial G/\partial m_в)_{P_e, T, m_{i\neq в}}, z = 0,$$

где $G$ — свободная энергия Гиббса,

$m_в$, $m_i$ — массы воды и остальных компонентов почвы,

$z = 0$ — нулевой уровень потенциала влаги поля земного притяжения.

По аналогии с вышеприведенными рассуждениями Г. Спозито устойчивость в постановке А. М. Глобуса в условиях гомогенности определяется положительным изменением влажности при движении поровой влаги под воздействием температуры и при промерзании.

Если предположить, что «скрытая» теплота фазового перехода влаги в почве $H_T$ незначительно меняется при постоянстве прочих независимых переменных ($\alpha_i$), то условием сбалансированности можно считать равенство изменения химических потенциалов твердой и жидкой фаз $d\mu_в = d\mu_л$ а критериями устойчивости — приведенные выше у Г. Спозито при $i = 3$ и $i = 4$. Однако А. М. Глобус считает это очень частным случаем главным образом из-за сложности тепломассопереноса влаги [5, 9, 12, 41].

При достаточно большой пористости и низкой влажности модель гомогенного почвенного раствора не позволяет получить общепринятый термодинамический критерий устойчивости [1, 35, 39, 41]. В этом случае можно руководствоваться работами Г. П. Бровки [5] и Б. В. Дерягина, Н. В. Тураева [12], в которых исследуются модели, где влага присутствует в виде смачивающих пленок.

Приведенные выше термодинамические модели и авторы описывают процессы, протекающие в почве, и приводят критерии устойчивости этих процессов. Однако, как отмечалось выше, функциональная устойчивость почв предполагает взаимодействие с биомом. И в этом плане интересна работа М. Аллэр [1]. В ней на основе эффективного потенциала воды приведена модель всасывания влаги почвы под действием давления, создаваемого листьями деревьев. Схематично, это некоторый объем почвы, пронизанный корнями дерева (растений), по которым движется вода и растворенные в ней вещества. Для него эффективный потенциал влаги равен:

$$\psi_e = \psi(H) + \frac{KL}{\lambda} \cdot \frac{dH}{dt},$$

где $\psi(H)$ — матричный потенциал влаги ($H$);

$L$ — средний путь воды в почве до поровой системы;

$\lambda$ — коэффициент проводимости.

Полный потенциал влаги между почвой и листом имеет вид:

$$VP_S = \psi(H) + K\frac{dH}{dt} + (\Delta\psi)_r + (\Delta\psi)_\upsilon,$$

где $V$ — удельный объем воды;

$P_S$ — давление всасывания;

$(\Delta\psi)_r$, $(\Delta\psi)_v$ — составляющие потенциала, обеспечивающие проникновение влаги в корни и продвижение по сосудистой системе растений.

В целом это явление носит название транспирации, а в совокупности с испарением — эвапотранспирации. Критерий почвенной устойчивости в данном случае — фактическая эвапотранспирация, и ее потенциал не должен превышать потенциальную эвапотранспирацию [1]. В противном случае начнется высыхание почвы и потеря ее устойчивости. Однако в этой модели не учтены особенности роста растения, заключающиеся в значимости суточной цикличности открывания и закрывания устьиц листьев. Следовательно, в годичном цикле важна еще и устойчивость этого процесса в период усиленного роста. Для рассматриваемых почвенно-климатических условий это 3-4 месяца. Кроме того, давление $P_S$, $(\Delta\psi)_r$, $(\Delta\psi)_v$ будут зависеть от длины и разветвленности корневой системы, так как наличие многолетнемерзлого горизонта меняет длину и форму корневой системы. Например, у лиственницы корневая система расположена большей частью горизонтально в пласте 0,5-1 м [20]. Это, в свою очередь, уменьшает потенциальную эвапотранспирацию, а значит, уменьшает диапазоны почвенной устойчивости.

Проблема взаимодействия почвы, корневой системы и растения применительно к хвойным деревьям может быть исследована одним из достаточно забытых в почвоведении методом моделирования, основанным на физико-химической теории активных столкновений [5, 20, 33]. Например, в гомогенных газовых реакциях основным источником активации считаются столкновения, а показателем — число столкновений. В растворах активация зависит, кроме того, от скорости диффузии в растворе молекул. В последнем случае возможно ввести влияние промерзания на инерционность диффузионных процессов.

Если перевести этот механизм в область влияния почв и других внешних факторов на урожайность, рост растений, деревьев, то мерой этих факторов Мичерлихом (1919) предложено считать дозы ($D_i$). Урожайность определялась достаточно простым выражением [20]:

$$\omega = \omega_{\max}(1-10^{-C_i D_i}),$$

где $C_i$ — коэффициент действия факторов $D_i$;

$\omega$ — урожайность.

В работе [42] приводятся примеры прироста ели для разных объемов почв и удобрений. При определенных дозах рост подавляется. Следовательно, присутствует потеря почвенной устойчивости. Однако авторы справедливо отмечают, что в лесоводстве рассматривают рост (продуктивность) не только в зависимости от внешней среды, но и от времени.

Томазиус [20] предложил вариант функции роста на основе теории встреч, но учитывающий время:

$$\omega(t) = \omega_{\max}(D = const)\left\{1-\exp\left[-k_D t(1-e^{-ct})\right]\right\}^{\alpha}.$$

Для роста в высоту ($H$) или по диаметру ($d$) $\alpha = 1$, и выражение принимает вид:

$$d(t) = d_{\max}\left[1 - \exp\left(-k_D t(1 - e^{-ct})\right)\right],$$

где $k_D$ — скорость влияния дозы почвенной органики,

$D$, $c$ — мера действенных «встреч» во времени.

Если применить это выражение для объемов почвы и потребления гумуса, можно получить оценки порогов инерционной функциональной устойчивости (см. выше) с учетом потребления корневой системы. Причем значения $k_D$ и $C$ можно получить на основе ДКХ для различных деревьев [36].

Нельзя не отметить аналитический обзор Е. В. Шеина [43] по проблемам и перспективам развития математического моделирования в почвоведении. В нем основное внимание уделено гидрофизическому подходу к моделированию, методике и программному обеспечению. Программы HYDRUS, одни из самых распространенных в практике проектирования и соответствующих исследований, позволяют получить динамические оценки диффузионной устойчивости в системе «почва — вода». Однако для оценки функциональной устойчивости почв требуется привлечение дополнительных пакетов программ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллэр М. Эффективный потенциал воды при высыхании почвы. Термодинамика почвенной влаги / М. Аллэр; пер. с англ.; под ред. А. М. Глобуса. Л.: Гидромет, 1966. С. 325-358.
2. Афонасьева И. С. Некоторые показатели устойчивости экосистем и их связь с почвенным плодородием на примере сельговых ландшафтов Северо-Западного Приладожья / И. С. Афонасьева, А. С. Федоров // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М.: Почв. ин-т РАСХН, 2002. С. 341.
3. Белобров В. П. К вопросу об устойчивости структур почвенного покрова / В. П. Белобров // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М.: Почв. ин-т РАСХН, 2002. С. 13.
4. Болт Г. Термодинамика воды в почве. Термодинамика почвенной влаги / Г. Болт, М. Фрисов; пер. с англ.; под ред. А. М. Глобуса. Л.: Гидромет, 1966. С. 274-301.
5. Бровка Г. П. Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании / Г. П. Бровка. Мн.: НавукаІтэхніка, 1991. 191 с.
6. Вавилевская В. Д. Оценка устойчивости функционирования почв России / В. Д. Вавилевская // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М.: Почв. ин-т РАСХН, 2002. С. 346.
7. Герасимова М. И. География почв России / М. И. Герасимова. М.: Изд-во МГУ, 2007. 314 с.
8. Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР / М. А. Глазовская. М.: Высш. Шк., 1988. 328 с.
9. Глобус А. М. Физика неизотермического внутрипочвенного влагообмена / А. М. Глобус. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 176 с.

10. Гречищев С. Е. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов / С. Е. Гречищев, Л. В. Чистотинов, Ю. Л. Шур. М.: Наука, 1984. 232 с.
11. Давлетшина М. Ф. Анализ устойчивости почв методами математического моделирования: автореф. дис. … канд. с.-х. наук / М. Ф. Давлетшина. Уфа, 2003. 24 с.
12. Дерягин Б. В. Смачивающие пленки / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. М.: Наука, 1984. 160 с.
13. Золотаев И. В. Химическое загрязнение и трансформация почв в районах добычи углеводородного сырья (обзор литературы) / И. В. Золотаев, И. В. Иванов, П. В. Михеев, А. Н. Никонова // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1505-1518.
14. Каппер О. Г. Хвойные породы / О. Г. Каппер. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1954. 304 с.
15. Керженцев А. С. Механизм функционирования почвы и устойчивость экосистем / А. С. Керженцев. Вестник Российской Академии Наук. Т. 80. № 8. 2010. С. 704-709.
16. Ковда В. А. Биохимия почвенного покрова / В. А. Ковда. М.: Наука, 1985. 264 с.
17. Коломыц Э. Г. Количественная оценка функциональной устойчивости лесных экосистем / Э. Г. Коломыц, Л. С. Шарая // Экология. 2015. № 2. С. 83-94. DOI: 10.7868/S0367059715020067
18. Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / Д. Кондепуди; пер. с англ. И. Пригожин. М.: Мир, 2002. 461 с.
19. Кузнецов В. И. Динамические системы в задачах вычислительной экологии леса / В. И. Кузнецов, Н. И. Козлов, Д. В. Кирьяков, Е. Н. Кирьякова. М.: ПолитбукМультимедиа, 2006. 111 с.
20. Лир Х. Физиология древесных растений / Х. Лир, Г. Польстер, Г. И. Фидлер. М.: Лесная промышленность, 1974.
21. Накаряков А. В. Концептуальная модель развития профиля почвы / А. В. Накаряков, А. С. Смирнов // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М.: Почв. ин-т РАСХН, 2002. С. 326.
22. Наумов В. Д. Причины нарушения устойчивости почвообразовательных процессов в таежно-лесной зоне при антропогенных воздействиях / В. Д. Наумов, В. И. Савич, Х. А. Амергужин, Ю. А. Юркина // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М.: Почв. ин-т РАСХН, 2002. С. 324.
23. Полынов Б. Б. Избранные труды / Б. Б. Полынов. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 752 с.
24. Росновский И. Н. Внешние воздействия и типы устойчивости почв / И. Н. Росновский, С. Г. Конысов // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М.: Почв. ин-т РАСХН, 2002. С. 11-12.
25. Рыжова И. М. Анализ устойчивости почв на основе теории нелинейных динамических систем / И. М. Рыжова // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М.: Почв. ин-т РАСХН, 2002. С. 79.
26. Сапожников А. П. О диагностике устойчивости лесных почв / А. П. Сапожников // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М.: Почв. ин-т РАСХН, 2002. С. 95–96.
27. Свирежев Ю. М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии / Ю. М. Свирежев. М.: Наука, 1987. 368 с.
28. Свирежев Ю. М. Устойчивость биологических сообществ / Ю. М. Свирежев, Д. О. Логофет. М.: Наука, 1978. 352 с.

29. Свирежев Ю. М. Устойчивость и сложность математической экологии / Ю. М. Свирежев // Устойчивость геосистем. М.: Наука, 1983. С. 41–50.
30. Смагин А. В. Моделирование динамики органического вещества почв / А. В. Смагин, Н. Б. Садовникова, М. В. Смагина и др. М.: Изд-во МГУ, 2001. 120 с.
31. Смагин А. В. Триггерные режимы функционирования и устойчивость динамических биокосных систем / А. В. Смагин // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М.: Почв. ин-т РАСХН, 2002. С. 78.
32. Спозито Г. Термодинамика почвенных растворов / Г. Спозито. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 240 с.
33. Теория активных столкновений // УТТП — инженерный ресурс. URL: http://corrosion.su/the_theory_of_active_collision/php/
34. Термодинамические аспекты механики мерзлых грунтов: сб. науч. тр. / под ред. С. С. Вялова. М.: Наука, 1988. 104 с.
35. Углов В. А. Нелинейная биодинамика (к постановке нового направления в изучении динамики и устойчивости процессов массо-энергопереноса в системах «почва — биоценоз») / В. А. Углов // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М.: Почв. ин-т РАСХН, 2002. С. 80.
36. Цибульский В. Р. Восстановление возраста и кривых прироста в древесно-кольцевых хронологиях хвойных пород севера Западной Сибири / В. Р. Цибульский, А. А. Коновалов, С. П. Арефьев // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2016. Т. 2. № 3. С. 59-70. DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-3-59-70
37. Цибульский В. Р. Природная среда Ямала / В. Р. Цибульский, Э. И. Валеева, С. П. Арефьев и др. Т. 1. Тюмень: Институт проблем освоения Севера СО РАН, 1995. 168 с.
38. Цибульский В. Р. Сравнительный анализ динамики древесно-кольцевых хронологий из разных пунктов на севере Западной Сибири / В. Р. Цибульский, С. П. Арефьев // Вестник кибернетики. 2015. № 1. С. 30-37.
39. Цибульский В. Р. Термодинамические основы саморегуляции и управления состоянием массива мерзлого грунта / В. Р. Цибульский // Труды междунар. симп. «Геокриологические исследования в Арктических районах». Ямбург, 1989 г. Тюмень: Ротапринт НИПИ КБС, 1990. Вып. III и II. С. 3-12.
40. Черкашин А. К. Теория и методы моделирования естественной и антропогенной динамики геосистем: автореф. дис. … д-р геогр. наук / А. К. Черкашин. Иркутск, 1993. 36 с.
41. Швецов П. Ф. Физическая геокриология / П. Ф. Швецов, В. П. Ковальков. М.: Наука, 1986. 176 с.
42. Шеин Е. В. Курс физики почв / Е. В. Шеин. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
43. Шеин Е. В. Математические физически обоснованные модели в почвоведении: история развития, современное состояние, проблемы и перспективы (аналитический обзор) / Е. В. Шеин // Почвоведение. 2015. № 7. С. 816-823. DOI: 10.7868/S0032180X15070096
44. Шоба С. А. Национальный атлас Российской Федерации / С. А. Шоба, Г. В. Добровольский и др. М.: Астрель, 2011. 632 с.
45. Шугалей Л. С. Устойчивость почв лесостепи и южной тайги Средней Сибири к экзогенным воздействиям / Л. С. Шугалей // Почвоведение. Вестник КрасГУ. 2009. № 9. С. 66-77.

**Vladimir R. TSIBULSKY**[1]
**Ilya G. SOLOVYEV**[2]
**Denis A. GOVORKOV**[3]

# MAIN APPROACHES TO SOIL STABILITY MODELING (A REVIEW)

[1] Dr. Sci. (Tech.), Professor, Chief Researcher,
Institute of the Problems of Northern Development,
Tyumen Scientific Center,
Siberian Branch of the RAS
v-tsib@yandex.ru

[2] Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Senior Researcher,
Institute of the Problems of Northern Development,
Tyumen Scientific Center,
Siberian Branch of the RAS
solovyev@ikz.ru

[3] Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher,
Institute of the Problems of Northern Development,
Tyumen Scientific Center,
Siberian Branch of the RAS
dagovorkov@mail.ru

**Abstract**

This article overviews the methods for assessing soil stability based on the mathematical models of "soil-phytocenosis" system. The map fragment of the soil stability from the "National Soil Atlas of the Russian Federation" is given as an example of such assessments' importance. The authors review the most common methods and models: score-based, index-based, bio-physical, thermodynamic, and physico-chemical ones. For the latter case, the authors consider a method and a model based on the theory of encounters, to which the researchers (engaged in logistic models, sigmoid functions

**Citation:** Tsibulsky V. R., Solovyev I. G., Govorkov D. A. 2017. "Main Approaches to Soil Stability Modeling (A Review)". Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology, vol. 3, no 4, pp. 6-23.
DOI: 10.21684/2411-7927-2017-3-4-6-23

and log-log functions) have recently turned their attention again. This article includes models and criteria for the soil processes stability both in isolation from biocenoses and in combination with them.

This review may interest researchers, undergraduates, and postgraduates of relevant specialties. For the specialists interested in the relevant software, reference is made to a review of related topics and software packages available for application in research practice. This review is more focused on ecosystem assessment.

**Keywords**

Soil, stability, mathematical models, biocenoses, criteria.

**DOI: 10.21684/2411-7927-2017-3-4-6-23**

## REFERENCES

1. Aller M. 1966. Effektivnyy potentsial vody pri vysykhanii pochvy. Termodinamika pochvennoy vlagi [Effective Potential of Water during the Drying of Soil. Thermodynamics of Soil Moisture]. Translated from English by A. M. Globus. Pp. 325-358. Leningrad: Gidromet.
2. Afonasyeva I. S., Fedorov A. S. 2002. “Nekotorye pokazateli ustoychivosti ekosistem i ikh svyaz' s pochvennym plodorodiem na primere sel'govykh landshaftov Severo-Zapadnogo Priladozh'ya” [Some Indicators of the Stability of Ecosystems and Their Relationship to Soil Fertility in the Example of the Rural Landscapes of the Northwest Ladoga Area]. In: Ustoychivost' pochv k estestvennym i antropogennym vozdeystviyam, pp. 341. Moscow: Pochv. in-t RASKhN.
3. Belobrov V. P. 2002. “K voprosu ob ustoychivosti struktur pochvennogo pokrova” [On the Question of the Stability of Soil Cover Patterns]. In: Ustoychivost' pochv k estestvennym i antropogennym vozdeystviyam, p. 13. Moscow: Pochv. in-t RASKhN.
4. Bolt G., Frisov M. 1966. “Termodinamika vody v pochve” [Thermodynamics of Water in Soil]. In: Termodinamika pochvennoy vlagi. Translated from English by A. M. Globus. Pp. 274-301. Leningrad: Gidromet.
5. Brovka G. P. 1991. Teplo- i massoperenos v prirodnykh dispersnykh sistemakh pri promerzanii [Heat and Mass Transfer in Natural Disperse Systems during Freezing]. Minsk: NavukaItekhnika.
6. Vavilevskaya V. D. 2002. “Otsenka ustoychivosti funktsionirovaniya pochv Rossii” [Assessment of the Stability of Soil Functioning in Russia]. In: Ustoychivost' pochv k estestvennym i antropogennym vozdeystviyam, p. 346. Moscow: Pochv. in-t RASKhN.
7. Gerasimova M. I. 2007. Geografiya pochv Rossii [Geography of Soils of Russia]. Moscow: Izd-vo MGU.
8. Glazovskaya M. A. 1988. Geokhimiya prirodnykh i tekhnogennykh landshaftov SSSR [Geochemistry of Natural and Technogenic Landscapes of the USSR]. Moscow: Vyssh. Shk.
9. Globus A. M. 1983. Fizika neizotermicheskogo vnutripochvennogo vlagoobmena [Physics of Non-Isothermal Intrasoil Exchange]. Leningrad: Gidrometeoizdat.

10. Grechishchev S. E., Chistotinov L. V., Shur Yu. L. 1984. Osnovy modelirovaniya kriogennykh fiziko-geologicheskikh protsessov [Basics of Modeling of Cryogenic Physical-Geological Processes]. Moscow: Nauka.
11. Davletshina M. F. 2003. "Analiz ustoychivosti pochv metodami matematicheskogo modelirovaniya" [Analysis of Soil Stability Using Mathematical Modeling]. Cand. Sci. (Aggricult.) diss. abstract. Ufa.
12. Deryagin B. V., Churaev N. V. 1984. Smachivayushchie plenki [Wetting Membranes]. Moscow: Nauka.
13. Zamotaev I. V., Nikonova A .N., Ivanov I. V., Mikheev P. V. 2015. "Khimicheskoe zagryaznenie i transformatsiya pochv v rayonakh dobychi uglevodorodnogo syr'ya (obzor literatury)" [Chemical Contamination and Transformation of Soils in Hydrocarbon Production Regions]. Pochvovedenie, no 12, pp. 1505–1518 [= Eurasian Soil Science, no 12, pp. 1370-1382].
14. Kapper O. G. 1954. Khvoynye porody [Coniferous Species]. Moscow; Leningrad: Goslesbumizdat.
15. Kergentsev A. S. 2010. "Mechanism of the Soil Functioning and Stability of Ecosystems". Herald of the Russian Academy of Sciences, vol. 80, no 8, pp. 704-709.
16. Kovda V. A. Biokhimiya pochvennogo pokrova [Biochemistry of Soil Cover]. Moscow: Nauka
17. Kolomyts E. G., Sharaya L. S. 2015. "Kolichestvennaya otsenka funktsional'noy ustoychivosti lesnykh ekosistem" [Quantitative Assessment of Functional Stability of Forest Ecosystems]. Ekologiya, no 2, pp. 83-94 [= Russian Journal of Ecology, no 2, pp. 117-127]. DOI: 10.7868/S0367059715020067
18. Kondepudi D., Prigogine I. 2002. Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur [Modern Thermodynamics]. Translated from English by I. Prigozhin. Moscow: Mir.
19. Kuznetsov V. I., Kozlov N. I., Kir'yakov D. V., Kir'yakova E. N. 2006. Dinamicheskie sistemy v zadachakh vychislitel'noy ekologii lesa [Dynamic Systems in the Tasks of the Computational Ecology of the Forest]. Moscow: PolitbukMul'timedia.
20. Lir H., Polster H., Fielder H-J. 1974. Fiziologiya drevesnykh rasteniy [Physiology of Woody Plants]. Moscow: Lesnaya promyshlennost'.
21. Nakaryakov A. V., Smirnov A. S. 2002. "Kontseptual'naya model' razvitiya profilya pochvy" [Conceptual Model of Soil Profile Development]. In: Ustoychivost' pochv k estestvennym i antropogennym vozdeystviyam, p. 326. Moscow: Pochv. in-t RASKhN.
22. Naumov V. D., Savich V. I., Amerguzhin Kh. A., Yurkina Yu. A. 2002. "Prichiny narusheniya ustoychivosti pochvoobrazovatel'nykh protsessov v taezhno-lesnoy zone pri antropogennykh vozdeystviyakh" [The Causes of the Disturbance of the Stability of Soil-Forming Processes in the Taiga-Forest Zone under Anthropogenic Influences]. In: Ustoychivost' pochv k estestvennym i antropogennym vozdeystviyam, p. 324. Moscow: Pochv. in-t RASKhN.
23. Polynov B. B. 1956. Izbrannye trudy [Selected Works]. Moscow: Izd-vo AN SSSR.
24. Rosnovskiy I. N., Konysov S. G. 2002. "Vneshnie vozdeystviya i tipy ustoychivosti pochv" [External Influences and Types of Soil Stability]. In: Ustoychivost' pochv k estestvennym i antropogennym vozdeystviyam, pp.11-12. Moscow: Pochv. in-t RASKhN.

25. Ryzhova I. M. 2002. “Analiz ustoychivosti pochv na osnove teorii nelineynykh dinamicheskikh sistem” [Analysis of Soil Stability Based on the Theory of Nonlinear Dynamical Systems]. In: Ustoychivost' pochv k estestvennym i antropogennym vozdeystviyam, p. 79. Moscow: Pochv. in-t RASKhN.
26. Sapozhnikov A. P. “O diagnostike ustoychivosti lesnykh pochv” [On the Diagnostics of the Stability of Forest Soils]. In: Ustoychivost' pochv k estestvennym i antropogennym vozdeystviyam, pp. 95-96. Moscow: Pochv. in-t RASKhN.
27. Svirezhev Yu. M. 1987. Nelineynye volny, dissipativnye struktury i katastrofy v ekologii [Nonlinear Waves, Dissipative Structures and Catastrophes in Ecology]. Moscow: Nauka
28. Svirezhev Yu. M. 1983. “Ustoychivost' i slozhnost' matematicheskoy ekologii” [Stability and Complexity of Mathematical Ecology], pp. 41-50. Moscow: Nauka.
29. Svirezhev Yu. M., Logofet D. O. 1978. Ustoychivost' biologicheskikh soobshchestv [Stability of Biological Communities]. Moscow: Nauka
30. Smagin A. V., Sadovnikova N. B., Smagina M. V. 2001. Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva pochv [Modeling the Dynamics of Soil Organic Matter]. Moscow: Izd-vo MGU.
31. Smagin A. V. 2002. “Triggernye rezhimy funktsionirovaniya i ustoychivost' dinamicheskikh biokosnykh sistem” [Trigger Modes of Operation and Stability of Dynamic Bio-Nutrient Systems]. Ustoychivost' pochv k estestvennym i antropogennym vozdeystviyam, p. 78. Moscow: Pochv. in-t RASKhN.
32. Spozito G. 1984. Termodinamika pochvennykh rastvorov [Thermodynamics of Soil Solutions]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
33. Teoriya aktivnykh stolknoveniy — UTTP inzhenernyy resurs [The Theory of Active Collisions — UTTP Engineering Resource]. http://corrosion.su/the_theory_of_active_collision/php/
34. Vyalova S. S. (ed.). 1988. Termodinamicheskie aspekty mekhaniki merzlykh gruntov [Thermodynamic Aspects of the Mechanics of Frozen Soils]. Moscow: Nauka.
35. Uglov V. A. 2002. “Nelineynaya biodinamika (k postanovke novogo napravleniya v izuchenii dinamiki i ustoychivosti protsessov masso-energoperenosa v sistemakh ‘pochva — biotsenoz’)” [Nonlinear Biodynamics (To the Formulation of a New Direction in The study of the Dynamics and Stability of Mass-Energy Transfer Processes in the Soil-Biocenosis Systems)]. In: Ustoychivost' pochv k estestvennym i antropogennym vozdeystviyam, p. 80. Moscow: Pochv. in-t RASKhN.
36. Tsibulsky V. R., Konovalov A. A., Arefyev S. P. 2016. “Vosstanovlenie vozrasta i krivykh prirosta v drevesno-kol'tsevykh khronologiyakh khvoynykh porod severa Zapadnoy Sibiri” [Restoration of Age and Gain Curves in the Tree-Ring Chronologies of Coniferous Plants in the North of the Western Siberia]. Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology, vol. 2, no 3, pp. 59-70. DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-3-59-70
37. Tsibul'skiy V. R., Valeeva E. I., Aref'ev S. P. et al. 1995. “Prirodnaya sreda Yamala.” [Natural Environment of Yamal], vol. 1. Tyumen: Institut problem osvoeniya Severa SO RAN
38. Tsibul'skiy V. R., Arefyev S. P. 2015. “Sravnitel'nyy analiz dinamiki drevesno-kol'tsevykh khronologiy iz raznykh punktov na severe Zapadnoy Sibiri” [Comparative

Analysis of the Dynamics of Tree-Ring Chronologies from Different Locations in the North of Western Siberia]. Vestnik kibernetiki, no 2, pp. 65-71.

39. Tsibul'skiy V. R. 1989. "Termodinamicheskie osnovy samoregulyatsii i upravleniya sostoyaniem massiva merzlogo grunta." [Thermodynamic Basis of Self-Regulation and Control of the State of the Frozen Ground Massif]. Proceedings of the International Symposium "Geokriologicheskie issledovaniya v Arkticheskikh rayonakh" (Yamburg), vols. 2, 3. pp. 3-12. Tyumen: Rotaprint NIPI KBS.
40. Cherkashin A. K. 1993. Teoriya i metody modelirovaniya estestvennoy i antropogennoy dinamiki geosistem [Theory and Methods for Modeling the Natural and Anthropogenic Dynamics of Geosystems]. Dr. Sci. (Geogr.) diss. abstract. Irkutsk.
41. Shvetsov P. F., Koval'kov V. P. 1986. Fizicheskaya geokriologiya [Physical Geocryology]. Moscow: Nauka.
42. Shein E. V. 2005. Kurs fiziki pochv [Course of Soil Physics]. Moscow: Izd-vo MGU
43. Shein E. V. 2015. "Matematicheskie fizicheski obosnovannye modeli v pochvovedenii: istoriya razvitiya, sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy (analiticheskiy obzor)" [Mathematical Physically Grounded Models in Soil Studies: History of Development, Current State, Problems and Prospects (Analytical Review)]. Pochvovedenie, no 7, pp. 816-823. DOI: 10.7868/S0032180X15070096
44. Shoba S. A., Dobrovol'skiy G. V. et al. 2011. Natsional'nyy atlas Rossiyskoy Federatsii [National Atlas of the Russian Federation]. Moscow: Astrel.
45. Shugaley L. S. 2009. "Ustoychivost' pochv lesostepi i yuzhnoy taygi Sredney Sibiri k ekzogennym vozdeystviyam" [Stability of Soils in the Forest-Steppe and Southern Taiga of Central Siberia to Exogenous Impacts / Soil Science]. Pochvovedenie. Vestn. KrasGU, no 9, pp. 66-77.