

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2025, Том 17, № 4 / 2025, Vol. 17, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2025.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/21NZVN425.pdf>

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Евграфова, И. М. Многофакторное моделирование геоэкологических процессов для оптимизации инженерно-экологических изысканий / И. М. Евграфова, О. Г. Кузнецова // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 4. — URL: <https://esj.today/PDF/21NZVN425.pdf>.

For citation:

Evgrafova I.M., Kuznetsova O.G. Multivariate modeling of geo-ecological processes for optimizing engineering and environmental surveys. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(4): 21NZVN425. Available at: <https://esj.today/PDF/21NZVN425.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 504.064.36

Евграфова Ирина Михайловна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

Профессор

Доктор технических наук, доцент

E-mail: irina-sen811@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2747-6705>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=433377

Кузнецова Ольга Григорьевна

ГБОУ города Москвы «Школа № 1212», Москва, Россия

Учитель

E-mail: o-g-k@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7684-1362>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=982129

Многофакторное моделирование геоэкологических процессов для оптимизации инженерно-экологических изысканий

Аннотация. В современной практике инженерно-экологических изысканий наблюдается ряд неопределённостей в части местоположения точек пробоотбора, что снижает информативность. Отбор проб почво-грунтов производится из скважин при инженерно-геологических изысканиях и из поверхностного слоя почвы с созданием объединённых проб. Вертикальный выбор точек при этом определяется геологическим, а не экологическим параметром, интервал соответствует 1 м. Поверхностные воды и донные отложения исследуются в случаях прямого воздействия объекта на водный объект, но не учитывается потенциальное воздействие и транспортирующая функция водной среды. Депонирующая функция растительности не учтена в современной практике изысканий. Авторами осуществлён учёт ландшафтных условий территорий для определения границ исследований. В статье приведены результаты моделирования геоэкологических процессов, основанных на степени нарушенности ландшафта. Решение найдено с помощью теории игр симплекс-методом. Полученные данные позволяют определить вклад территорий по степени нарушенности и конкретизировать точки пробоотбора. Моделирование транзитной функции природных вод позволяет выявить участки с высоким накопительным потенциалом с последующим их изучением. В качестве полигона для исследования выбрано Сура-Свияжское междуречье Приволжской возвышенности, территория

ранее не исследованная в геоэкологическом аспекте, но имеющая значение для определения фоновых показателей в региональном масштабе. Проведенное моделирование для магистрального поселкового газопровода природного газа давлением более 1,6 МПа в Чувашской Республике позволило конкретизировать местоположение точек пробоотбора, а определённые фоновые значения показателей качества окружающей среды позволили достоверно определить её загрязнение. Предложенные подходы использованы авторами на практике с положительным эффектом, что позволяет оптимизировать инженерно-экологические изыскания, повысив их информативность и достоверность.

Ключевые слова: геоэкологические процессы; инженерно-экологические изыскания; моделирование экологических процессов; почвы; грунты; ландшафтный анализ; природные воды

Введение

На предпроектной и проектной стадии жизненного цикла объекта капитального строительства наблюдается недостаточность методического обеспечения в установлении границ проведения инженерно-экологических изысканий, пространственного определения местоположения точек отбора и установление репрезентативных фоновых концентраций загрязнения окружающей среды [1–3], ландшафтный подход позволил бы решить данную проблему [4]. Анализ мировой практики геоэкологического сопровождения строительства показал, что она не может быть использована при инженерно-экологических изысканиях, как отдельного вида обязательных работ [5; 6]. В таблице 1 приведены основные методы изыскательских работ.

Таблица 1

Методы изыскательских работ в РФ

Среда	Отбор проб	Показатели
Почвы	1 проба на 1–5 га для площадного объекта (п. 5.1 ГОСТ 17.4.3.01-2017). 1 проба на 1–4 км для линейного объекта (п. 7.1.8.6. СП 502.1325800). Глубина отбора: 0,2–0,3 м	Стандартный перечень. Расширенный перечень (выборочно для функциональных зон, территорий), п. 7.1.8.6 СП 502.1325800
Грунты	Из скважин с интервалом через 1 м на глубину земляных работ с учётом сведений о загрязнённости	Стандартный перечень. Расширенный перечень (выборочно для функциональных зон, территорий), за исключением показателей эпидемической опасности
Подземная вода	Как правило совпадает с количеством проб почвы. Глубина отбора: первый от поверхности водоносный горизонт	Стандартный перечень (табл. 4.4 СП 11-102-97, прил. И СП 502.1325800.2021). Расширенный перечень — для территорий промышленных объектов, полигонов с учётом существующих источников загрязнения (прил. 6 СанПиН 2.1.3684-21, табл. 5.10 СП 502.1325800 и иные)
Поверхностная вода	Пересекаемые водные объекты и водные объекты в зоне потенциального воздействия (в водоохранной зоне, сброс сточных вод)	Табл. 5.10. СП 502.1325800.2021 (кроме радиохимических исследований), приложение В РД 52.24.643-2002
Донные отложения	В местах отбора проб поверхностных вод на участках ведения работ, связанных с нарушением дна	С учётом требований к качеству почв и действующей системы мониторинга табл. 5.10 СП 502.1325800.2021 (кроме санэпид исследований)

Составлено авторами

Основная цель работы — оптимизация инженерно-экологических изысканий посредством многофакторного моделирования геоэкологических процессов.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Определение фоновых маркерных показателей изучаемой территории.
2. Моделирование геоэкологических процессов.
3. Апробирование полученных результатов на практике.

Методы

Почвы отбирались методом конверта на глубину 10–20 см. В лаборатории образцы почв усреднялись, доводились до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре в течение нескольких суток и затем определялась гигроскопическая влага [7].

Объединённые пробы почв озолялись, затем рассчитывалась зольность и потеря массы при прокаливании и содержание органического вещества. В отобранных почвенных образцах проводились общие почвенные анализы и ряд химических элементов и соединений [8; 9]. Дополнительно в почвенных образцах определялось содержание подвижных соединений железа, извлекаемых кислотной вытяжкой HCl.

Все измерения производились в многократной повторности, обеспечивающей точность результатов. Одновременно определялось содержание растворимых соединений железа, связанных с органическим веществом, в вытяжке по методу Баскомба [10]. Пробоотбор воды осуществлялся согласно действующим методикам [11], в разные гидрологические фазы из поверхностного слоя [12] и, либо консервировались, либо немедленно доставлялись в лабораторию.

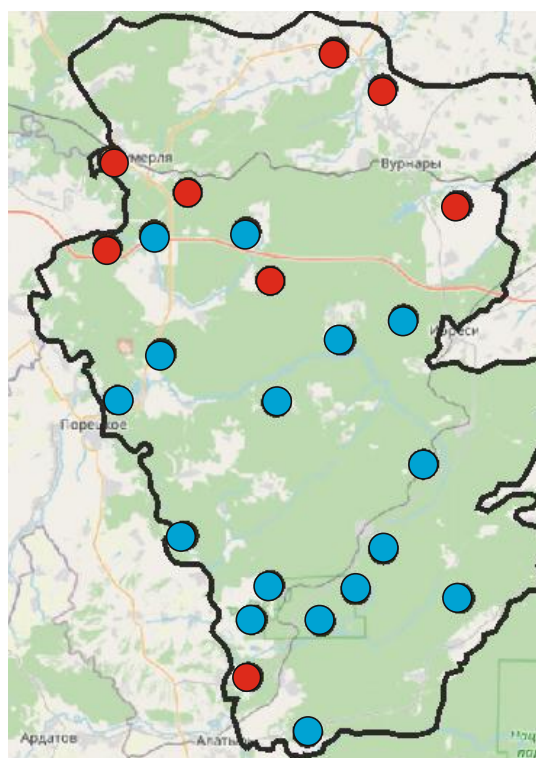
У типичной для данного региона растительности отбирались древесина, листья, хвоя, стебли, генеративные органы, побеги с листьями и соцветиями. Места отбора проб было удалено от антропогенных источников вредного воздействия и нарушенных ландшафтов. Донные отложения извлекались с помощью дночерпателя.

Натурно-экспериментальные исследования проводились на территории Сура — Свяжского междуречья Приволжской возвышенности в экспедициях 2007–2009, 2000–2013, 2019, 2022–2024 годах на ключевых участках, выбранных по степени нарушенности ландшафта. Карта-схема выбранных ключевых участков представлена на рисунке 1.

Основные геоэкологические процессы, проходящие на территории, — это транзиторные, характеризующиеся состоянием природных вод, и аккумулятивные, определяемые почво-грунтами, донными отложениями и растительностью определяются транзиторной средой (природные воды) и аккумулятивными средами (почво-грунты, донные отложения и растительность).

Для установления степени влияния аккумулятивных и транзиторных факторов на участке инженерно-экологических изысканий и определения информативной точки отбора проб. Участок изысканий-экологических изысканий расчленяется на ключевые по ландшафтному принципу, исходя из информативности (максимальный вклад — абсолютный max 100, минимальный вклад — абсолютный min 0).

В практических вариантах наблюдается неравновесная система, таким образом, необходимо найти оптимальное состояние модели можно с помощью «теории игр». Матрица геоэкологической системы представлена в таблице 2.



Красный цвет — слабонарушенный ландшафт; синий цвет — ненарушенный ландшафт

Рисунок 1. Карта-схема ключевых участков исследования (составлено авторами)

Таблица 2

Матрица геоэкологической системы (пример)

	Степень нарушенности ландшафта			
	ненарушенный	слабо нарушенный	сильно нарушенный	
Первый уровень состояние среды (загрязнение менее ПДК (ОДК) с учётом фона)	0	20	50	0
Второй уровень состояния среды (загрязнение = ПДК (ОДК) с учётом фона)	10	20	30	<u>min 10</u>
Третий уровень состояния среды (загрязнение > ПДК (ОДК) с учётом фона)	0	30	40	0
	0	<u>max30</u>	30	

Составлено авторами

Матрица эффекта в примере составлена для содержания загрязняющих веществ в почво-грунтах. Минимальная чистая цена данной матрицы, 2 фонового состояния $\alpha(A) = 10$ меньше максимальной чистой цены загрязнения $\beta(A) = 30$, матрица не имеет решения в чистых стратегиях и решается в смешанных стратегиях $\alpha(A) = 10 > 0$ с помощью симплекс-метода.

Последовательность математического моделирования транзиторной функции природных вод при инженерно-экологических изысканиях проводится в следующей последовательности.

1. По водосборным территориям проводится корректировка границ инженерно-экологических изысканий.
2. Выделяют ключевые участки по ландшафтному признаку, строятся профили катен, определяются степени нарушенности участков.
3. Устанавливаются характеристики территории (геоэкологические и гидрометеорологические).

4. Определяются распределение поверхностного потока, устанавливаются гидрологические характеристики и размываемость почво-грунтов.
5. Устанавливаются потенциально опасные зоны по накоплению загрязняющих веществ.

Результаты

Результаты фоновое содержания загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды представлены в таблицах 3–5.

Таблица 3

Фоновое содержание подвижных форм некоторых тяжелых металлов в почве Сура-Свияжского междуречья (поверхностный слой)

Место взятия образца	Содержание тяжелого металла, мг/кг / ПДК, мг/кг (для нейтральных и слабощелочных почв)						
	Fe/-	Mn/1500	Pb/6,0	Zn/23,0	Cu/3,0	Cd/0,5	Cr/0,6
Ельник	51,5	10,7	0,25	0,82	1,0	0,046	0,001
Смешанный лес	479,0	22,8	0,42	1,69	0,90	0,039	0,153
Пахотное поле	159,0	6,15	0,35	1,16	1,69	0,014	0,272
Дерново-слабоподзолистая	121,0	2,11	0,18	1,15	1,11	0,017	0,166
Поле. Разнотравье	457,0	10,1	0,34	0,33	0,56	0,0001	0,172
Широколиственный лес	80,9	27,2	0,94	1,00	1,03	0,0001	0,001
Пойма реки Сура	450,0	21,2	0,76	3,07	2,12	0,057	0,086
Подзолистая супесчаная почва	61,1	13,3	0,24	1,18	1,10	0,008	< 0,001
Затон р. Сура. Разнотравье	535,0	15,0	0,59	2,46	1,99	0,017	0,237
Илистый грунт р. Сура	0,57	0,10	0,009	0,029	0,069	0,003	0,300

Составлено авторами

Содержание загрязняющих веществ в растительности зависит от многих факторов, вегетативных и среды обитания. Даже на склоне растение одного и того же вида могут иметь различное содержание загрязняющих веществ [13]. Добровольский В.В. [14] выявил избирательную аккумуляцию загрязняющего вещества в растениях, обусловленную способностью к образованию стойких органических комплексов.

В таблице 4 представлены фоновые биохимические характеристики растений Сура-Свияжского междуречья.

Таблица 4

Фоновые биохимические характеристики растений Сура-Свияжского междуречья

Вид растения	Исследуемая часть	Зольность, %	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Mn, мг/кг
Ива козья	Зеленые органы	6,02 ±0,10	346,07 ±32,85	767,66 ±11,63	11305,26 ±18,05
	Стебли	1,89 ±0,13	486,56 ±9,45	1897,03 ±21,78	9204,90 ±45,12
Клевер горный	Зеленые органы	5,0 ±0,32	169,32 ±31,45	296,94 ±14,62	1519,44 ±12,64
Пырей ползучий	Стебли	4,8 ±0,21	171,71 ±2,62	395,29 ±12,11	2869,68 ±15,43
Ива корзиночная	Зеленые органы	4,78 ±0,87	86,42 ±3,44	634,59 ±4,23	11742,86 ±32,18
	Древесина	2,04 ±0,64	206,00 ±5,99	1557,57 ±12,96	21041,35 ±27,74

Составлено авторами

Решение матрицы геоэкологических факторов для изучаемой территории $x_1 + x_2 + x_3 \rightarrow \max$ с учётом ограничивающих условий определяется симплекс-методом и позволяет найти оптимальную стратегию — вектор $p^0 = (0,25; 0; 0,2)^{0,45}$. Оптимальное геоэкологическое решение — это использование смешанного подхода оптимизации инженерно-экологических изысканий по учёту фонового загрязнения территорий различной степени нарушенности, при

этом при любых входных условиях данной матрицы решение будет меньше максимальной «цены игры» согласно теории игр.

Расчётная схема моделирования транзиторной функции природных вод представлена на рисунке 2. Расчётные характеристики в таблице 5.

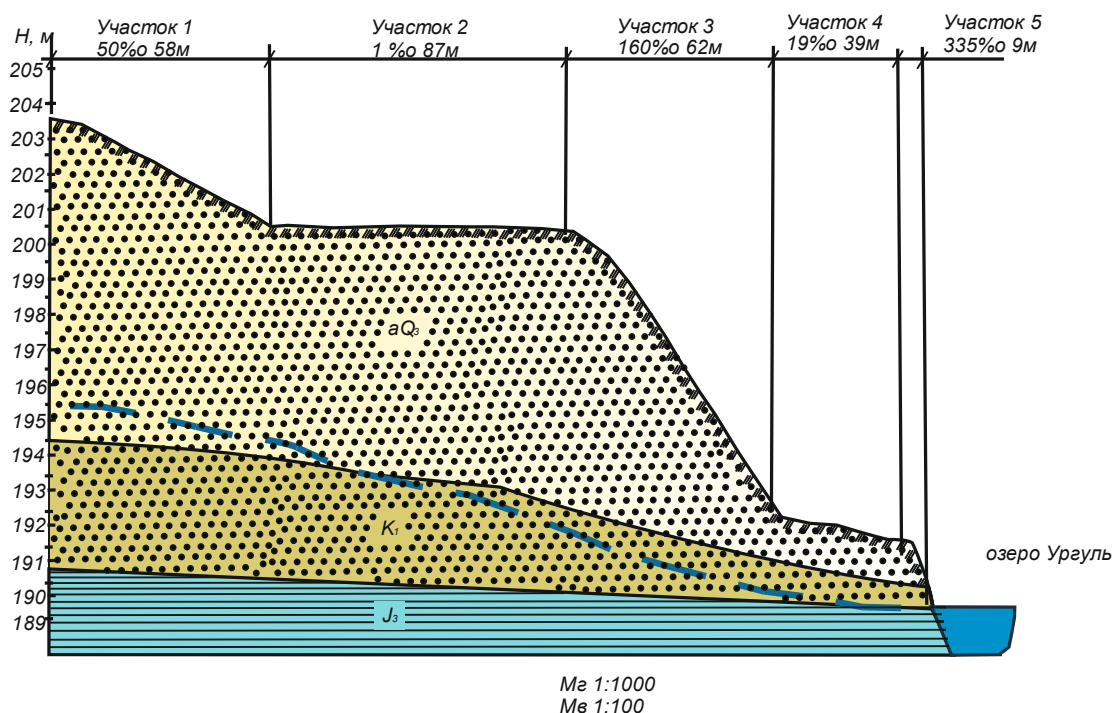


Рисунок 2. Расчётная схема моделирования транзиторной функции природных вод (составлено авторами)

Таблица 5

Расчёт интенсивности стока природных поверхностных вод на расчётном участке Сура-Свияжского междуречья

№ участка	Тип грунта	Расчётные характеристики				
		уклон, ‰	гидравлическая шероховатость склона	коэффициент впитывания	интенсивность впитывания, мм/мин	интенсивность стока, мм/мин
1	Песок	50	15	5,0	36,1	-33,85
2	Песок	1	15	5,0	67,6	-65,33
3	Песок	160	27	5,0	26,1	-23,85
4	Песок	19	27	5,0	50,1	-47,85
5	Глина	335	50	0,005	0,0211	2,23 (сток в озеро)

Составлено авторами

Обсуждение

Фоновое содержание подвижных форм тяжелых металлов в поверхностном слое почв Сура-Свияжского междуречья меньше ПДК. Повышенное содержание железа обусловлено выносом этого элементами грунтовыми водами из железосодержащих горных пород. Места превышения приурочены к зонам разгрузки родников в р.Сура. Исследованные пробы растений на содержание тяжелых металлов Сура-Свияжского междуречья показали, что основной источник их поступления почво-грунты.

Проведённое моделирование позволило апробировать разработанные подходы на практике для магистрального поселкового газопровода природного газа давлением более 1,6 Мпа. Результаты апробации представлены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты применения моделирования геоэкологических процессов для оптимизации инженерно-экологических изысканий (на примере линейного объекта капитального строительства)

Критерии	Показатели		Выводы о достижимости показателя
	до применения метода оптимизации	после применения метода оптимизации	
Типизация ландшафта, разделение на ключевые участки	Почвенно-растительное описание	Ландшафтное описание	Информативность повышена, при сохранении объёмов работ
Почвенные условия участка. Гранулометрический состав; сумма поглощенных оснований; кол-во органического вещества; подвижные формы кальция	Определение точек пробоотбора. Фоновые значения без учёта региональной специфики (кол-во объединённых проб 17, сумма поглощенных оснований; кол-во органического вещества; подвижные формы кальция не определялись, накопительная и транзиторная функция не известна)	Физико-химические свойства почв и грунтов, донных отложений определяются в точках отбора проб по ландшафтному признаку и в соответствии с фоновыми значениями база данных для Сура-Свияжского междуречья. Определен аккумулятивный и транзиторный потенциал участков территории	Количество точек наблюдений увеличилось при составлении инженерно-экологических карт увеличилось на 3 штуки и совпало с количеством точек отбора проб для почво-грунтов и донных отложений. Повысилась информативность и точность фоновых данных по загрязнению среды. Объемы работ увеличился незначительно
Химический состав компонентов окружающей среды	Фоновые значения не определялись. Порубочный материал обоснован как отходы V класса опасности. Все пробы почво-грунтов приняты как незагрязненные	Фоновые значения определены из базы данных для Сура-Свияжского междуречья, что позволило признать 5 проб грунтов как загрязненные Древесный порубочный материал признан отходами 4 класса опасности, что позволило скорректировать принятые проектные решения	Повышение информативности и точности данных изысканий. Корректировка принятых проектных решений. Объем работ увеличился незначительно
Моделирование транзиторных функций ландшафтного участка	Не проводилось	Осуществлено в рамках научного сопровождения как способа обоснования принятых проектных решений	Повышение информативности и достоверности данных инженерно-экологических изысканий
Моделирование преваляирования приоритетных показателей при научном сопровождении проектно-изыскательской деятельности	Не проводилось		
Обоснование местоположения точек пробоотбора	Обоснование в соответствии с действующими требованиями, входящими в Реестр Минстроя РФ		

Составлено авторами

Краткие выводы по результатам исследования и перспективы их дальнейшего развития

1. Ландшафтный подход при многофакторном моделировании геоэкологических процессов позволил найти оптимальное пространственное решение по проведению инженерно-экологических изысканий.
2. Математическое моделирование транзиторных функций природных вод в зоне инженерно-экологических изысканий позволило авторам выявить территории с накопительным и транзиторным потенциалом для определения точек пробоотбора.
3. Анализ практической реализации методики оптимизации инженерно-экологических изысканий для проектов линейного строительства показал, что она может применяться с положительными результатами и рядом ограничений, связанных с

источниками загрязнения, геоэкологическими параметрами, типами объектов и зонами с особыми условиями землепользования.

4. Научно обоснованные рекомендации по оптимизации инженерно-экологических изысканий могут быть реализованы на практике с положительными результатами.
5. Основными путями дальнейшего развития научных исследований является учет территорий с особыми правилами землепользования и создание более сложной модели прогнозирования загрязнения окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова, Е.Н. Оценка химического загрязнения городской почвы при инженерно-экологических изысканиях в г. Санкт-Петербурге / Е.Н. Волкова, О.В. Юшина // XXV Международный Биос-форум и молодежная Биос-олимпиада 2020: сб. материалов, Санкт-Петербург, 1-5 окт. 2020 г.: в 2 кн. Кн. 2. — СПб.: СПбНЦ РАН, 2020. — С. 443–447.
2. Stewart, R.A. Evaluating web-based project information management in construction: capturing the long-term value creation process / R.A. Stewart, S. Mohamed // Automation in Construction. — 2004. — Т. 13, № 4. — С. 469–479.
3. Баклашкина, Е.А. Методические аспекты инженерно-экологических изысканий для проектов рекультивации загрязненных отходами потребления территорий / Е.А. Баклашкина, А.В. Шепелева // Метеорологический вестник. — 2018. — Т. 10, № 2. — С. 79–89.
4. Кузнецова, О.Г. Валовый анализ некоторых компонентов ландшафтов Сура-Свияжского междуречья Приволжской возвышенности / О.Г. Кузнецова // Денисовские чтения: материалы Междунар. науч. конф. в рамках Года экологии РФ, Москва, 20 апр. 2017 г. / каф. инженер. изысканий и геоэкологии НИУ МГСУ; вып. 8. — М.: НИУ МГСУ, 2018. — С. 134–138.
5. Tambwe, O.T. Benefits of construction data risks management in the construction industry / O.T. Tambwe, C.O. Aigbavboa, O. Akinradewo // Journal of Engineering, Design and Technology. — 2025. — Т. 23, № 2. — С. 458–476.
6. Turner, A.K. Discretization and stochastic modeling / A.K. Turner // Applied Multidimensional Geological Modeling: Informing sustainable human interactions with the shallow subsurface. — 2021. — С. 295–317.
7. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. — М.: Мир, 1989. — 440 с.
8. Булышева, А.М. Предложения к методике проведения почвенных исследований в составе свода правил по инженерно-экологическим изысканиям / А.М. Булышева, В.А. Жигульский // Инженерно-экологические изыскания — нормативно-правовая база, современные методы и оборудование: материалы Общерос. науч.-практ. конф., Москва, 27–28 февр. 2019 г. — М.: Геомаркетинг, 2019. — С. 43–48.
9. Добровольский, В.В. Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами / В.В. Добровольский // Почвоведение. — 1999. — № 5. — С. 639–645.

10. Козинцев, С.Н. Комплексный подход к проведению инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий с применением метода биоиндикации / С.Н. Козинцев, О.В. Базарский // Сергеевские чтения: материалы конф., Москва, 23–24 марта 2010 г.; вып. 12. — М.: РУДН, 2010. — С. 450–455.
11. Стурман, В.И. Картографические аспекты инженерно-экологических изысканий / В.И. Стурман // Инженерные изыскания. — 2018. — Т. 12, № 1-2. — С. 54–64.
12. Ковальский, В.В. Геохимическая среда, микроэлементы, реакции организмов / В.В. Ковальский // Проблемы геохимической экологии: тр. Биогеохим. лаб. — М.: Наука, 1991. — Т. 22. — С. 5–23.
13. Флеенко, А.С. Разработка методики перехода к технологиям информационного моделирования в инженерных изысканиях (на примере инженерно-экологических изысканий) / А.С. Флеенко, А.Ф. Демьяненко // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. — 2021. — Т. 19, № 3. — С. 70–82.
14. Добровольский, В.В. Биосферные циклы тяжелых металлов и регуляторная роль почвы / В.В. Добровольский // Почвоведение. — 1997. — № 4. — С. 431–441.

Evgrafova Irina Mikhailovna

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

E-mail: irina-sen811@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2747-6705>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=433377

Kuznetsova Olga Grigorevna

School No. 1212, Moscow, Russia

E-mail: o-g-k@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7684-1362>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=982129

Multivariate modeling of geo-ecological processes for optimizing engineering and environmental surveys

Abstract. In the modern practice of engineering and environmental surveys, there are a number of uncertainties regarding the location of sampling points. Spatial uncertainty can lead to unreliable results. Soil and subsoil samples are collected from wells during engineering and geological surveys, or a combined sample is taken from the surface layer, and the vertical selection of points is determined by geological rather than environmental parameters, with an interval of 1 m. Surface water and bottom sediments are studied in cases of direct impact of an object on a water body, but the potential impact and transporting function of the aquatic environment are not taken into account. The depositing function of vegetation is not taken into account in modern survey practice. The authors present the possibility of taking into account the landscape conditions of territories to determine the boundaries of research. The article presents a model of geo-ecological processes based on the degree of landscape disturbance and solved using the game theory of the simplex method. The obtained data allow to determine the contribution of territories by the degree of disturbance and to specify the sampling points. Modeling the transit function of natural waters allows to identify areas with high accumulation potential with their subsequent study. As a test site for the study, the Sura-Sviyazh interfluvium of the Tga Upland is chosen, the territory previously not studied in the geo-ecological aspect, but having the importance for determining background indicators at the regional scale. The modeling conducted for a main settlement gas pipeline with a natural gas pressure of more than 1,6 MPa in the Chuvash Republic allowed for the specific location of sampling points, and the determined background values of environmental quality indicators allowed for the reliable determination of environmental pollution. The proposed approaches have been used by the authors in practice with positive results, which allows for the optimization of engineering and environmental surveys, increasing their informativeness and reliability.

Keywords: geo-ecological processes; engineering and environmental surveys; modeling of environmental processes; soils; grounds; landscape analysis; natural waters