

DOI 10.31029/vestdnc94/6

УДК 504.064

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ  
В НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВАХ  
СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

**М. В. Носова**<sup>1</sup>, ORCID: 0000-0001-7985-6474  
**В. П. Середина**<sup>2</sup>, ORCID: 0000-0002-7432-1726  
**С. А. Стовбуник**<sup>1</sup>, ORCID: 0000-0000-0000-0000

<sup>1</sup>АО «ТомскНИПИнефть», Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский  
государственный университет, Томск, Россия

**DISTRIBUTION OF MOBILE FORMS OF HEAVY METALS  
IN OIL-CONTAMINATED ALLUVIAL SOILS OF THE MIDDLE TAIGA  
SUBZONE OF WESTERN SIBERIA**

**M. V. Nosova**<sup>1</sup>, ORCID: 0000-0001-7985-6474  
**V. P. Seredina**<sup>2</sup>, ORCID: 0000-0002-7432-1726  
**S. A. Stovbunik**<sup>1</sup>, ORCID: 0000-0000-0000-0000

<sup>1</sup>JSC «TomskNIPInef», Tomsk, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Аннотация. Рассмотрено влияние сырой нефти на морфологические параметры почв по шкале Манселла (светлота, насыщенность окраски, цвет). В окраске почв, загрязненных нефтью (хемоземы), преобладают ахроматические цвета. Зафиксировано изменение цветовых тонов от 7,5YR–5YR до Gley 1–Gley 2. Показано превышение концентраций и распределение подвижных форм тяжелых металлов-технолофилов (Pb, Zn, Cu, Ni, V, Mn) в корнеобитаемых горизонтах нефтезагрязненных аллювиальных почв Западной Сибири. Установлено содержание подвижных форм ТМ в различных зонах техногенной нагрузки (эпицентр, периферийная зона, граница нефтяного загрязнения), а также в незагрязненных (фоновых и условно-фоновых) почвах. Выявлены закономерности распространения поллютантов по мере удаления от источника загрязнения. Обнаружены статически значимые связи между содержанием в почвах подвижных форм ТМ, содержанием нефтепродуктов,  $C_{орг}$  и  $pH_{вод}$ . Исследование показало, что доля тяжелых металлов по кратности превышений ПДК согласно СанПиН 1.2.3685–21 и фоновых значений в нефтезагрязненных почвах убывает в следующем ряду:  $V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn$ .

Abstract. The article considers influence of crude oil on the parameters of lightness and color saturation measured on the Munsell scale. Oil-contaminated soils (chemozems) are characterized by low color horizons; achromatic colors (gray, black) predominate in color, and the brightness parameter decreases. A change in color tones from 7.5YR–5YR to Gley 1–Gley 2 is recorded. Excessive concentrations and distribution of mobile forms of heavy metals-technophiles (Pb, Zn, Cu, Ni, V, Mn) in the root horizons of oil-contaminated alluvial soils of Western Siberia are shown. The content of mobile forms of heavy metals has been established in various zones of technogenic load (epicenter, peripheral zone, boundary of oil pollution), as well as in uncontaminated soils (background and conditional background). Revealed have been patterns of distribution of pollutants while distancing from the source of pollution. Statically significant relationships have been discovered between the content of mobile forms of heavy metals in soils, the content of petroleum products,  $C_{org}$  and  $pH_{water}$ . The study shows that the share of heavy metals in terms of the multiple excess of MPC according to Sanitary Rules and Norms 1.2.3685–21 and background values in oil-contaminated soils decreases in the following order:  $V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn$ .

Ключевые слова: нефтезагрязнение, аллювиальные почвы, подвижные формы, тяжелые металлы, ПДК, шкала Манселла.

Keywords: oil pollution, alluvial soils, mobile forms, heavy metals, maximum permissible concentrations, the Munsell scale.

**Введение**

Нефтяные месторождения Западной Сибири являются основным районом добычи нефти в Российской Федерации. При интенсивной разработке и эксплуатации месторождений окружающая природная среда испытывает значительную техногенную нагрузку, что часто приводит к загрязнению и деградации экосистем. Локальное загрязнение почв представляет особую опасность, так как в ряде случаев оно формирует техногенную геохимическую аномалию. При этом разливы нефти, возникающие на местах добычи, вследствие коррозионных процессов, а также изношенности трубопроводного промышленного

транспорта представляют собой одни из источников загрязнения почв опасными тяжелыми элементами. Содержание тяжелых металлов в почвах после аварийного разлива зависит как от состава нефти, так и от исходных свойств почвы. Как указывается в работах [1–9], в нефти и нефтепродуктах были обнаружены Fe, Cr, Co, Ni, Mo, Hg, Sn и др., среди которых выделяются элементы-технофилы, такие как Pb, Zn, Cu, Ni, V и Mn. В отличие от загрязнения нефтепродуктами, тяжелые металлы в почвах не разлагаются, а лишь перераспределяются между компонентами экосистемы. В случае разливов нефти в пойменных ландшафтах (аллювиальные почвы) нефть и ТМ попадают в речную систему вследствие миграции загрязнителей. Для почв территории Западной Сибири имеются ограниченные данные по содержанию валовых форм тяжелых металлов [10, 11], при этом содержание подвижных форм тяжелых металлов, увеличение которых связано с аварийными разливами нефти, практически не изучено. В связи с этим изучение содержания и распределения тяжелых металлов в почвах является наиболее важной задачей современного почвоведения и экологии.

Цель настоящего исследования – изучить особенности накопления подвижных тяжелых металлов-технофилов (Pb, Zn, Cu, Ni, V, Mn) в поверхностных горизонтах нефтезагрязненных аллювиальных почв.

### Материал и методы исследований

Объектами исследования послужили почвы на участках разлива сырой нефти на территории средней тайги Западной Сибири в пределах Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО). Очаги загрязнения возникли после порыва промысловых трубопроводов в центральной части поймы р. Оби (нефтяное загрязнение). Нефтяное загрязнение в дальнейшем рекультивировано в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, а загрязненный участок проверен и успешно сдан представителю надзорных органов. Влияние загрязнения углеводородами нефти (УВН) и тяжелыми металлами в природных условиях проведено путем сравнения свойств хемоземов с их фоновыми аналогами. Для нефтезагрязненных почвенных проб на площадке нефтяного разлива получены категориальные и количественные оценки по системе измерения цвета по шкале Манселла.

Объект исследования разделен по зонам: эпицентр загрязнения (промзона трубопроводного транспорта); периферийная зона загрязнения (в 3 метрах от центра разлива) и граница загрязнения (в 5 метрах от эпицентра загрязнения), фоновые почвы (в 10 км на север от нефтяного месторождения); условный фон (в 500 м от границы загрязнения). Систематическое положение почв на каждом обследованном участке определено по Классификации и диагностике почв России (2004) [12] и World Reference Base for Soil Resources (2022) [13]. Исследования проведены спустя 1–2 месяца с момента загрязнения. В каждой из вышеперечисленных зон были заложены почвенные прикопки: по 26 в эпицентре и периферийной зоне загрязнения и по 25 на границе загрязнения, фоновых почвах, условном фоне.

Образцы почв отбирали из четырех вышеперечисленных точек с различной степенью загрязнения с глубин 0–10, 10–20 см. Как известно, верхние горизонты играют роль биогеохимического барьера на пути потока нефти. При промывном водном режиме поллютанты активно мигрируют вглубь почвы и оседают в горизонтах, выступающих геохимическими барьерами (иллювиальные и глеевые горизонты). В различных зонах распространения поллютантов проводилось морфологическое описание почв и определялось общее проективное покрытие растительности (ОПП).

П–1 – эпицентр разлива (n = 26). Отбор проб поведился в понижении центральной части поймы р. Оби. На поверхности отмечается сплошная битумизированная корка. Почва однородная, темно-серая, почти черная. В сухом состоянии по шкале Манселла – яркость 3, цветность 5В, тон Gley 2. Горизонт бесструктурный, тяжелосуглинистый, вязкий, сырой, уплотненный. Присутствуют корни растительных остатков, встречаются глыбистые агрегаты (d 3,5–5 см), пропитан нефтью с характерным сильным запахом, переход по окраске не заметен, границы не дифференцируются.

В самом эпицентре загрязнения наблюдается полная деградация древесно-кустарничкового яруса. Встречаются единичные экземпляры таволги иволистной (*Spiraea salicifolia* L. 1753), лютика ползучего (*Ranunculus repens* L. 1753) с явно выраженными морфологическими изменениями: темная окраска, нарушение нормальных пропорций, высохшие стебли и листья. ОПП = 10%.

П–2 – периферия разлива (в 3 м от центра разлива) (n = 26). На поверхности слабо выраженная битумизированная корка. Почва однородная, серого цвета. В сухом состоянии по шкале Манселла – яркость 5, цветность N, тон Gley 1. Горизонт бесструктурный, с цементированными глыбистыми включениями в маслянистой пленке. Присутствуют корни растительных остатков и комковатые агрегаты (d 2,5 см), пропитан нефтью, переход по окраске не заметен, границы не дифференцируются.

К периферии загрязнения приурочены частично деградированные кустарничковые ассоциации рябины сибирской (*Sorbus sibirica* Hedl. 1901), таволги средней (*Spiraea media* L. 1792), шиповника иглистого (*Rosa acicularis* L. 1820). Растительность сильно угнетена, генеративные органы не развиты. ОПП = 45%.

П–3 – граница разлива (n = 25). Краевая часть разлива нефти, примыкающая к периферии разлива. На поверхности размытые радужные пленки. Окраска неоднородная, серо-бурая. В сухом состоянии по шкале Манселла – яркость 7, цветность 3, тон 7,5YR. Встречаются охристые пятна оксида железа (d около 1 см), серые пятна полуразложившегося органического вещества, присутствуют живые корни. Горизонт уплотненный, свежий, мелкокомковатой структуры, среднесуглинистый. Переход ясный по окраске, граница ровная.

В травяно-кустарничковом ярусе доминируют подросты березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и осины (*Populus tremula* L. 1753). ОПП = 60%.

На основании этих признаков исследованные почвы (П–1, П–2, П–3) относятся к хемоземам нефтезагрязненным по аллювиальной почве (*Solonchaks Fluvis Toxic*).

П–4 – фон (n = 25). Фоновый участок расположен на пониженном плоском дренируемом периодически затапливаемом участке поймы реки Оби. При выборе фоновых участков соблюдалось требование максимальной однородности факторов почвообразования – почвообразующих пород, элементов рельефа и характера растительности.

Окраска верхнего горизонта однородная, серо-бурая. В сухом состоянии по шкале Манселла – яркость 7, цветность 3, тон 5YR. Состоит из остатков травянистой растительности различной степени разложения. Почвенные горизонты пронизаны корневыми системами луговой растительности. Переход ясный по составу почвенной массы, граница ровная.

Кустарничково-разнотравные сообщества участка образованы ивами (*Salix* sp.), черной смородиной (*Ribes nigrum* L. 1753), таволгой иволистной (*Spiraea salicifolia* L. 1753), лабазником (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim. 1879), горошком мышиным (*Vicia cracca* L. 1753), а также лютиком ползучим (*Ranunculus repens* L. 1753), калужницей (*Caltha palustris* L. 1753), осокой (*Carex* sp.). ОПП = 80%.

П–5 – «условный фон» (n = 25). Пробы из данных прикопок отбирались на однородных участках в непосредственной близости от места аварийного разлива нефти. Следов загрязнения нефтью не обнаружено. Морфологическое описание соответствует фоновым почвам (П–4): окраска однородная, серо-бурая, по шкале Манселла – яркость 7, цветность 3, тон 5YR. Состоит из остатков травянистой растительности различной степени разложения. Присутствуют остатки корневых систем луговой растительности, в меньшей степени, чем в почвах П–4. Переход ясный по составу почвенной массы, граница ровная.

По сравнению с ненарушенными фоновыми участками здесь отмечается как обеднение видового состава, так и инвазия видов, свойственных территориям, находящимся в непосредственной близости от рекультивированных участков, ранее подвергшихся нефтяному загрязнению, а именно: появление таких нефтестойких трав, как люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* L. 1753), донник желтый (*Melilotus officinalis* L. 1779), клевер луговой (*Trifolium pratense* L. 1753). ОПП = 70%.

Фоновые и условно фоновые почвы диагностируются как аллювиальные серогумусовые типичные глееватые ненасыщенные средне-мелкие тяжелосуглинистые (*Stagnosols Fluvis*).

Полевой отбор проб и подготовка почв к комплексу химико-аналитических исследований проводили согласно ГОСТ 17.4.4.02–84. Лабораторная часть исследований включает определение следующих показателей: рН<sub>вод</sub> потенциометрическим методом ГОСТ 26423–85, содержание C<sub>орг</sub> – по И.В. Тюрину в модификации Д.С. Орлова и Л.А. Гришиной в соответствии с ГОСТ 26213–91.

Определение содержания подвижных форм тяжелых металлов в вытяжках из почв выполняли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП). Нефтепродукты

в почве определялись флуориметрическим методом ПНД Ф 16.1:2.21–98. В работе использовались параметрические методы статистики (коэффициент корреляции Пирсона –  $R^S$ ). Полученные данные также были сгруппированы по зонам загрязнения с определением диапазона данных ( $lim=min-max$ ), среднего и стандартного отклонения ( $SD$ ).

### Результаты исследований

В исследованных аллювиальных нефтезагрязненных почвах максимальное содержание тяжелых металлов характерно для верхних замазученных горизонтов. Эта закономерность проявляется во всех зонах техногенной нагрузки: эпицентр, импактная зона, граница нефтяного пятна (табл. 1).

**Таблица 1.** Концентрация подвижных форм тяжелых металлов в нефтезагрязненных почвах, мг/кг

Глубина	Pb	Zn	Cu	Ni	V	Mn
Эпицентр загрязнения (П-1, n = 26)						
0–10	11,1–12,3	63,2–64,7	10,1–12,4	20,5–23,5	32,7–39,5	761–862
10–20	6,4–8,8	34,5–40,1	7,1–7,4	17,1–17,7	24,4–33,2	589–602
Периферийная зона (П-2, n = 26)						
0–10	10,1–14,8	36,2–45,1	5,6–8,4	12,0–15,9	23,4–35,2	603–689
10–20	6,4–8,4	40,8–51,2	4,4–5,6	10,1–12,8	14,2–17,6	496–581
Граница загрязнения (П-3, n = 25)						
0–10	7,1–8,2	24,3–28,4	4,8–7,0	8,2–9,9	12,2–17,6	386–456
10–20	5,5–6,8	18,1–22,5	2,9–3,9	7,6–8,6	9,1–10,8	271–354
Фон (П-4, n = 25)						
0–10	1,3–2,2	3,1–6,3	<0,5–0,9	<0,5–3,8	1,9–3,1	94–104
10–20	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5–2,7	0,8–2,9	43–56
Условный фон (П-5, n=25)						
0–10	1,8–2,7	5,5–8,8	<0,5–1,8	2,9–5,4	3,1–5,1	98–124
10–20	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5–3,6	2,5–4,3	60,4–76,4
ПДК по СанПиН 1.2.3685–21						
-	6,0	23,0	3,0	4,0	–*	100,0**
Встречаемость значений выше фона, ПДК, %						
0–10	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
10–20	97 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Максимальная кратность превышения ПДК, min – max						
0–10	1,8 ПДК– 3 ПДК	2,7 ПДК– 2,8 ПДК	3,3 ПДК– 4,1 ПДК	5,1 ПДК– 5,9 ПДК	18–11 ФОН*	7,6 ПДК– 8,6 ПДК
10–20	0 ПДК– 1,4 ПДК	0 ПДК– 2,2 ПДК	0 ПДК– 2,3 ПДК	1,9 ПДК– 4,4 ПДК	8–10 ФОН*	2,7 ПДК– 6 ПДК

Примечание: \* – ПДК не установлены; \*\* – извлекаемый ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8.

Для изучения закономерностей распределения концентраций подвижных форм тяжелых металлов, проведено сравнение их значений с величиной предельно допустимых концентраций и фоновым содержанием. Отмечается двукратное и более превышение в верхней части загрязненных почв всех определяемых ТМ (Pb, Zn, Ni, V, Mn, Cu). В сравнении с гигиеническими нормативами, на глубине 0–10 см в 100,0 % случаев почвы загрязнены тяжелыми металлами. Наибольшее значение наблюдается у марганца – в 8,6 раза превышает предельно допустимую концентрацию. В связи с отсутствием ПДК в отношении подвижных форм V для оценки степени загрязнения почв использовались фоновые значения. Доля подвижных форм тяжелых металлов по кратности превышений ПДК в почвах убывает в следующем ряду: V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn.

Свинец (Pb). Содержание свинца убывает как с глубиной профиля почв, так и в горизонтальном направлении при движении к краевым зонам загрязнения. ПДК подвижных форм, установленных Сан-Пин, составляет 6,0 мг/кг. Все почвы исследуемых зон загрязнения имеют концентрацию Pb выше ПДК и фона: для верхних горизонтов характерно превышение в 1,6–2 раза, для образцов, отобранных на глубине до 20 см, – до 1,4 раза. Стоит отметить, что поскольку в составе загрязняющих веществ нефти присутствует сера, то в восстановительных условиях создается вторичная сероводородная среда и металлы образуют нерастворимые или слаборастворимые сульфиды, закрепляя соединения Pb в почве.

Цинк (Zn). Соединения цинка подвижны и могут мигрировать в почвах на большие глубины, формируя таким образом вторичный очаг загрязнения. Тем не менее в почвах зафиксированы значительные концентрации данного элемента в верхних горизонтах: от 18,1 до 64,7 мг/кг, что в 1,5–3 раза превышает ПДК. Распределение ТМ в почвах имеет преимущественно регрессивно-аккумулятивный характер.

Медь (Cu). Медь при высоких концентрациях в почве образует комплексы с органическим веществом, органо-минеральные и специфически сорбированные формы с гидроксидами Fe и Mn [14, 15]. Поэтому именно медь является одним из индикаторов нефтяного загрязнения почв. В гумусовых горизонтах основная доля техногенной Cu связана с органическими соединениями, и ее содержание колеблется от 2,9 до 12,4 мг/кг, что в 1,5–4 раза выше ПДК. В единичных случаях превышения ПДК отсутствуют.

Никель (Ni) и ванадий (V). Механизм распределения в почвах данных элементов при загрязнении схож, поэтому они будут рассмотрены в паре. Установлено, что в нефтезагрязненных почвах V и Ni закрепляются в поверхностном слое. Это объясняется вхождением их в состав парафинов нефти, высокоароматических соединений. Благодаря такому средству Ni и V прочно закреплены в составе тяжелых фракций нефти – асфальтенов, которые в свою очередь накапливаются на поверхности почв при загрязнении, образуя «битуминизированные корки». В фоновых почвах концентрации данных элементов минимальны.

Все образцы нефтезагрязненных почв в верхних горизонтах имеют концентрацию подвижных Ni и V выше ПДК и фоновых значений. По современным данным, опасность ванадия в почвах очень велика, его токсичность выше свинца, а опасность никеля выше опасности мышьяка. В связи с этим накопление в верхнем корнеобитаемом слое нефтезагрязненных почв токсичных металлов, особенно подвижных форм V и Ni, может негативно влиять на естественную (природную) и ремедиационную деструкцию нефти и нефтепродуктов микроорганизмами. Концентрация подвижных форм никеля в почвах достигает 4,8 ПДК на глубине 0–10 см, 4,4 ПДК – на глубине 10–20 см.

Марганец (Mn). Марганец как наиболее подвижный элемент мигрирует вглубь почвы или осаждается на окислительном барьере, накапливаясь на поверхности почвы, что объясняет высокие концентрации данного элемента на глубине 0–10 см. Максимальное содержание (862 мг/кг почвы) отмечается в эпицентре загрязнения. Высокие концентрации подвижных форм марганца позволяют судить о сильном загрязнении почв данным элементом: его содержание в 8,6 раз превышает ПДК на глубине 0–10 см и в 4,4 раза на глубине 10–20 см.

**Таблица 2.** Содержание  $S_{орг}$ , НП и показатель  $pH_{вод}$  в нефтезагрязненных почвах, мг/кг

Глубина, см	$S_{орг}$ , %	НП, г/100 г почвы	$pH_{вод}$
Эпицентр загрязнения (П-1, n = 26)			
0–10	<u>14,36±3,38</u>	<u>66,45±13,16</u>	<u>8,05±0,64</u>
	10,7–18,01	16,23–72,26	7,6–8,5
10–20	<u>8,45±2,51</u>	<u>50,72±12,75</u>	<u>7,7±1,13</u>
	5,51–12,82	11,82–65,61	6,9–8,5
Периферийная зона (П-2, n = 26)			
0–10	<u>13,5±3,41</u>	<u>52,02±8,98</u>	<u>6,95±0,92</u>
	11,09–15,91	11,53–68,12	6,3–7,6
10–20	<u>6,08±3,12</u>	<u>43,47±9,09</u>	<u>6,3±0,57</u>
	5,47–9,61	10,09–50,23	5,9–6,8
Граница загрязнения (П-3, n = 25)			
0–10	<u>9,46±6,71</u>	<u>13,3±2,19</u>	<u>6,5±0,57</u>
	4,71–14,2	4,43–13,74	6,1–6,9
10–20	<u>5,99±2,99</u>	<u>5,69±1,14</u>	<u>6,05±0,92</u>
	9,3–2,76	3,98–7,08	5,4–6,7

Примечание: Под чертой –  $\lim = \min - \max$ ; над чертой – среднее ± ошибка среднего значения.

Mn сорбируется на твердой фазе в зависимости от значения  $pH_{вод}$ : больше при высоком  $pH_{вод}$ , чем при низком. Полученные данные указывают, что в наиболее щелочных горизонтах почв (гумусо-аккумулятивных) связь между признаками прямая и тесная.

Для установления экологического состояния почв в образцах определялись педохимические показатели – те свойства почв, изменение которых может быть вызвано загрязняющими веществами и которые

могут отрицательно влиять на живые организмы. К ним относятся показатели важнейших химических свойств почв: содержание  $C_{орг}$  и нефтепродуктов, реакция почвенного раствора ( $pH_{вод}$ ) (табл. 2). Данные по фону (П-4), условному фону (П-5) в таблице не представлены в связи с содержанием НП менее 0,5 г/100 г почвы и отсутствием необходимости проведения дальнейшего корреляционного анализа.

В качестве подтверждения закономерностей в распределении концентраций исследуемых подвижных форм тяжелых металлов в связи с изменением вышеперечисленных параметров рассчитывались коэффициенты корреляции ( $R^S$ , табл. 3).

**Таблица 3.** Коэффициенты корреляции ( $R^S$ ) ТМ с основными параметрами почв

Параметр	Pb	Zn	Cu	Ni	V	Mn	Цветовая шкала $R^S$
Эпицентр загрязнения (n=26)							
$C_{орг}$	0,87	0,76	0,88	0,91	0,94	1,00	0,90
НП	0,94	0,77	0,84	0,93	0,91	1,00	0,80
$pH_{вод}$	0,78	0,83	0,92	0,89	0,89	0,96	0,70
Периферийная зона (n=26)							0,60
$C_{орг}$	0,76	0,73	0,83	0,81	0,88	1,00	
НП	0,93	0,74	0,81	0,91	0,84	1,00	
$pH_{вод}$	0,68	0,68	0,78	0,83	0,79	0,93	
Граница загрязнения (n=25)							
$C_{орг}$	0,73	0,67	0,71	0,75	0,78	1,00	
НП	0,96	0,71	0,68	0,83	0,72	0,97	
$pH_{вод}$	0,77	0,76	0,93	0,81	0,86	0,79	

Во всех зонах техногенной нагрузки наблюдается закономерность увеличения концентрации подвижных форм с увеличением  $pH_{вод}$ , что подтверждается тесной корреляцией ( $R^S = 0,68-1,0$ ); коэффициент корреляции плавно убывает в ряду ТМ:  $V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn$ . При этом характер распределения подвижных форм ТМ в почвах имеет преимущественно регрессивно-аккумулятивный тип. Все элементы также имеют тесную корреляционную связь с содержанием НП.

Содержание подвижных Zn, Ni, V, Pb имеет тесную корреляционную связь с  $pH_{вод}$ ,  $C_{орг}$ , а также НП, что свидетельствует об их закреплении в верхних горизонтах в виде органоминеральных комплексов.

Учитывая небольшое содержание подвижных форм ТМ в фоновых почвах района исследования и относительно высокую концентрацию их в верхних горизонтах нефтезагрязненных почв, можно сделать заключение о том, что аварийные разливы нефти способствуют техногенному привносу в почвы подвижных форм ТМ.

Полученные результаты рекомендуется использовать в локальном (производственном) мониторинге состояния и загрязнения окружающей среды на территории Западной Сибири, а также для контроля качества проведения рекультивационных мероприятий от нефтезагрязнения. Следует отметить, что разработка и внедрение новых методов очистки и ремедиации загрязненных почв является актуальным направлением научных исследований. В дополнение к существующим методам биоремедиации и химической стабилизации могут быть разработаны инновационные подходы для эффективного устранения вредных воздействий тяжелых металлов и других загрязнителей на экосистемы.

### Заключение

Первичным индикатором нефтяного загрязнения аллювиальных почв является трансформация морфологических признаков почвенных горизонтов. Параметры светлоты и насыщенности окраски, измеряемые по шкале Манселла, в нефтезагрязненных почвах снижаются с 7,5YR и 5YR до Gley 1/Gley 2/2,5YR.

Изучение подвижных форм тяжелых металлов в нефтезагрязненных почвах позволяет выявить следующие особенности. Установлено, что нефть и нефтепродукты являются источником поступления в почву подвижных форм тяжелых металлов (V, Mn, Ni, Cu, Pb, Zn). В 90% случаев наблюдается прямая зависимость между их концентрацией и содержанием нефтепродуктов в почве ( $R^S = 0,71-1,00$  при  $p < 0,05$ ). Доля подвижных форм тяжелых металлов по кратности превышений ПДК по СанПиН 1.2.3685-21 и фоновым значениям в нефтезагрязненных почвах убывает в следующем ряду:  $V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn$ .

Максимальное содержание тяжелых металлов характерно для корнеобитаемых горизонтов. Тяжелые металлы ассоциированы со смолисто-асфальтовыми фракциями нефти, которые при разливах аккумулируются на поверхности почвы. Их накопление в верхнем горизонте снижает способность почв к самовосстановлению и препятствует восстановлению проективного покрытия во время рекультивационных мероприятий на биологическом этапе (фиторемедиации).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Геннадиев А.Н. Нефть и окружающая среда // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2016. № 6. С. 30–39.
2. Нефтезагрязненные почвы: свойства и рекультивация / под ред. В.П. Серединой. Томск: НИ ТПУ, 2006. 270 с.
3. Водяницкий Ю.Н., Добровольский В.В. Железистые минералы и тяжелые металлы в почвах. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1998. 216 с.
4. Водяницкий Ю.Н., Васильев А.А., Лобанова Е.С. Загрязненность тяжелыми металлами и металлоидами почв г. Пермь // Агрехимия. 2009. № 4. С. 60–68.
5. Smith S.R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge // Environment International. 2009. Vol. 35, N 1. P. 142–156.
6. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
7. Du & Yu, Du, C. W., & Yu, Y. J. Distribution of heavy metals in the soils of the mining area in Western Liaoning Province. International Journal of Environmental Research. 2012. P. 31–33.
8. Nwaichi E.O., Wegwu M.O., Nwosu U.L. Monitoring of some heavy metals and volatile organic compounds in groundwater of Gokana, Rivers State, Nigeria // Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology. 2015. Vol. 7, N 1. P. 1–10.
9. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении / изд. 2-е, перераб. и доп.; под ред. Д.С. Орлова. М.: Высшая школа, 2002. 334 с.
10. Якименко В.Н., Конарбаева Г.А., Бойко В.С., Тимохин А.Ю. Экологическая оценка содержания тяжелых металлов в почвах агроценозов Западной Сибири // Экология и промышленность России. 2020. № 24(12). С. 52–57.
11. Ильин В.Б., Сысо А.И., Байдина Н.Л., Конарбаева Г.А., Черевко А.С. Фоновое количество тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири // Почвоведение. 2003. № 5. С. 550–556.
12. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: ООО Ойкумена, 2004. 342 с.
13. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria, 2022. 236 p.
14. McBride M. B. Reactions controlling heavy metal solubility in soils // Adv. Soil Sci. 1989. Vol. 10. P. 1–57.
15. Носова М.В. Влияние нефтесолевого загрязнения на экологическое состояние почв поймы реки Оби в условиях среднетаежной подзоны Западной Сибири : дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2024. 213 с.

Поступила в редакцию 29.05.2024 г.

Принята к печати 26.09.2024 г.

\* \* \*

**Носова Мария Владимировна**, инженер 1-й категории, Томский научно-исследовательский проектный институт нефти и газа (АО «ТомскНИПИнефть»); e-mail: NosovaMV@tomsknipi.ru

**Maria V. Nosova**, engineer 1st category, Tomsk Research Design Institute of Oil and Gas (JSC “TomskNIPIneft”); e-mail: NosovaMV@tomsknipi.ru

**Середина Валентина Петровна**, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения и экологии почв, Томский государственный университет; e-mail: seredina\_v@mail.ru

**Valentina P. Seredina**, Doctor of Biology, professor, professor of the Department of Soil Science and Soil Ecology, Tomsk State University; e-mail: seredina\_v@mail.ru

**Стовбунник Сергей Анатольевич**, главный специалист, Томский научно-исследовательский проектный институт нефти и газа (АО «ТомскНИПИнефть»); e-mail: StovbunikSA@tomsknipi.ru

**Sergey A. Stovbunik**, main specialist, Tomsk Research Design Institute of Oil and Gas (JSC “TomskNIPIneft”); e-mail: StovbunikSA@tomsknipi.ru