

ЛАНДШАФТНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕАБИЛИТАЦИИ РАДИАЦИОННО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ. СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Линник В.Г.¹, Волосов А.Г.¹, Потапов В.Н.², Савельев А.А.³, Соколов А.В.¹,
Соколов П.В.¹, Сурков В.В.⁴.

¹Институт аналитической химии и геохимии им. В.И. Вернадского, 119991,
Москва, ул.Косыгина, 19, linnik@geokhi.ru

²Курчатовский Институт, Москва, Россия, potapov_v@mail.ru

³Казанский Университет, экологический факультет, г.Казань

⁴Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Географический факультет, 119992, Москва, ГСП-2, Россия

Развитие современных геоинформационных технологий открывает принципиально новые возможности для реконструкции истории радионуклидного загрязнения. Основой технологий является моделирование и представление результатов радиоэкологических исследований в виде электронных карт или пространственно-координированных баз данных.

В период 1958-1992 гг. в результате производственной деятельности Горно-Химического Комбината (ГХК), расположенного на удалении 40 км вниз по течению р.Енисей от г.Красноярска, происходило поступление техногенных радионуклидов в речную систему. Это привело к загрязнению русла реки и поймы на значительных расстояниях от места сброса радиоактивных отходов.

Для получения интегрированной характеристики загрязнения зоны влияния Горно-химического комбината (г. Железногорск) организована комплексная радиоэкологическая информационная система «РАДЛЕГ-РАДИНФО», включающая разработку базы мета-данных по радиационным объектам Советского ядерного комплекса на основе ГИС-технологий. Информация получена в ходе проведения в 1999-2000 гг. комплексной экспедиции в рамках выполнения международного проекта STREAM [6]. Комплексные ландшафтно-радиоэкологические исследования включали определение радиоактивности почвы, полевое дешифрирование космических снимков для составления фациальных схем аллювиальных отложений, описание геоморфологии

участка. База использованных данных включает следующие информационные массивы, необходимые для оценки радиационного загрязнения и реконструкции дозовых нагрузок:

- Удельная активность искусственных радионуклидов (^{137}Cs , $^{152,154,155}\text{Eu}$, ^{60}Co) и естественных (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) в почвах пойменных разрезов
- Продолжительность затопления пойменных участков среднего течения р.Енисей в период с 1960 по 2000 гг.
- Ландшафтные схемы изученных участков

Ландшафтно–геоморфологическая схематическая карта поймы р.Енисей построена с целью создания картографической основы для оценки радиационного загрязнения в результате выбросов Красноярского ГХК и уточнения распределения радионуклидов в долине среднего Енисея. Карта масштаба 1:200000 включает отрезок долины реки от пос. Атаманово до устья р. Ангары протяжённостью 245 км (90 – 335 км по руслу Енисея, считая от г. Красноярск). Здесь выделены основные геоморфологические структуры: пойменные ступени, террасы, долины боковых притоков, бечевники, побочни и осерёдки. В результате анализа структуры и описания почвенного и растительного покрова установлено 11 типов крупных геоморфологических элементов.

При создании карты в легенде использованы следующие градации грунтов: скальные породы, валунники и галечники, крупно- и среднезернистые пески, мелко- и тонкозернистые пески, суглинки, глины, илы, торфа.

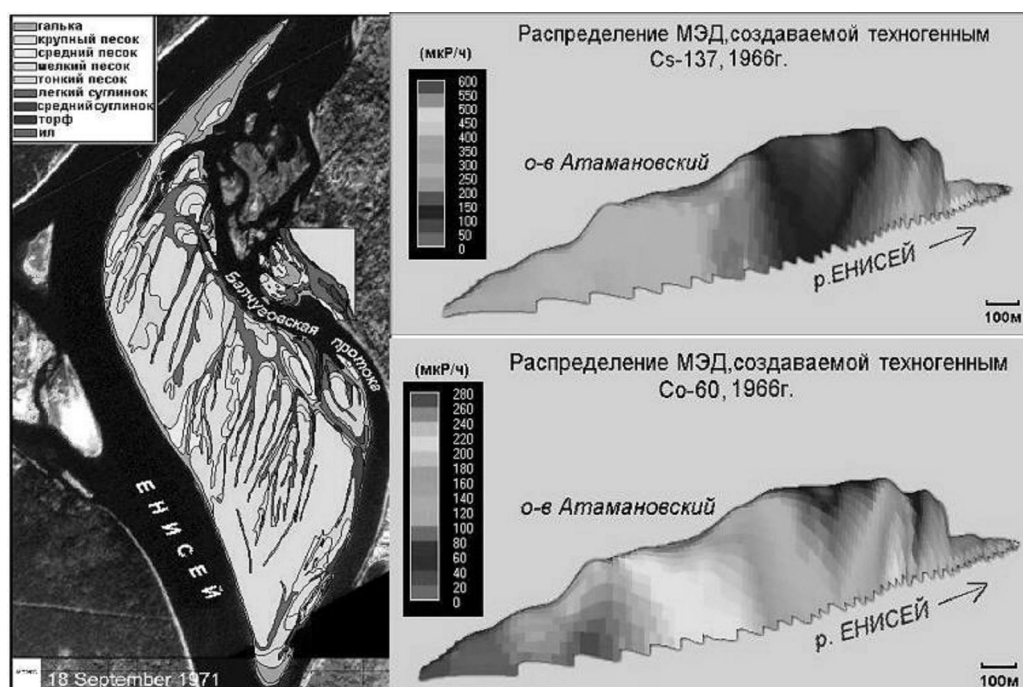


Рис.4 Литологическое строение пойменных ландшафтов р.Енисей (о.Березовый) и реконструкция дозовой нагрузки (о.Атамановский)

Рельеф показан изолиниями, в метрах от меженного уреза. Основные изолинии (0, 1,5, 3,5, 6, 8, 11 и 15 м) соответствуют высотным границам основных ступеней поймы. Это сечение рельефа позволяет показать не только ступени поймы, но и основные старичные понижения, валы и гривы, а также рассчитать продолжительность и вероятность затопления каждого уровня и построить схему затопления поймы. В качестве меженного уреза выбран уровень 95%-обеспеченности, установившийся после сооружения Красноярской ГЭС. До сооружения ГЭС минимальные уровни были на 1 – 1,5 м ниже.

Для оценки современной радиационной обстановки в пойме р.Енисей в зоне влияния ГХК и ее реконструкции создана геоинформационная система, включающая опубликованные экспериментальные данные, полученные в ходе изучения радиационного загрязнения поймы р. Енисей (почв, донных отложений и воды) за период с 1991 по 2000 гг. [1], а также набор ландшафтных и литологических карт. Это позволяет провести оценку риска загрязнения техногенными радионуклидами и необходимости проведения реабилитационных мероприятий с учетом ландшафтной структуры поймы.

Ландшафтно-гидрологические и почвенно-геохимические условия пойменных участков определяют характер радионуклидного загрязнения, который формирует дозовые поля излучения над поверхностью почвы. Радиационная нагрузка для проживающего населения может быть получена путем прямых измерений или с помощью модельных расчетов. Необходимым условием для проведения таких расчетов является наличие информации о распределении активности радионуклидов в почве. Как правило, такую информацию получают с помощью радиометрической съемки [4] загрязненной территории или методом пробоотбора. В частности, радиометрическая съемка позволяет определять поверхностную активность радионуклидов в верхнем слое почвы толщиной до 3-х длин свободного пробега, оценивать толщину чистого слоя и определять мощность слоя, в котором содержится от 80 до 100% всей активности радионуклидов [5].

Гранулометрический состав аллювиальных отложений формируется в процессе паводков и отражает их гидрологический режим, а вклад различных фракций в общую активность почвенного слоя характеризует влияние гидрологического режима на

перенос радионуклидов [2]. В пойменном аллювии среднего течения реки Енисей главным носителем ^{137}Cs являются тонкие пески, суглинки и илы (глины), тогда как носитель ^{60}Co и ^{152}Eu -- средние суглинки и илы (глины). Максимальное осаждение радионуклидов может наблюдаться в местах отложения илистой или песчано-илистой фракции (зоны вмешательства), тогда как галечники представляют зоны транзита радионуклидов и не требуют вмешательства (реабилитации).

Изучение структуры пойменных почв и распределения в них ^{137}Cs показало [3]:

1 Распределение удельной активности ^{137}Cs в частицах различного размера, слагающих пойменный аллювий, имеет классический вид, связанный с известной закономерностью -- увеличением адсорбционной способности частиц с уменьшением их размера (рис. 1).

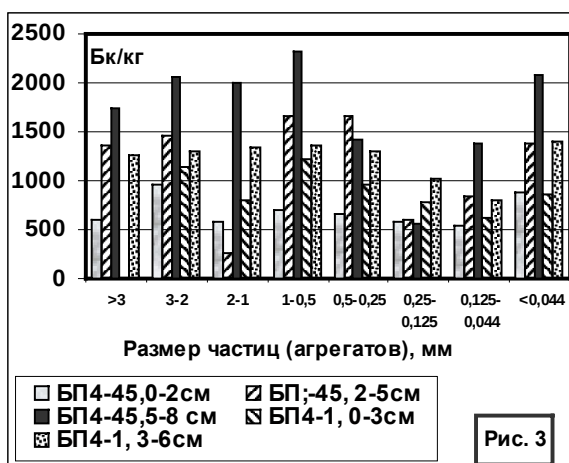
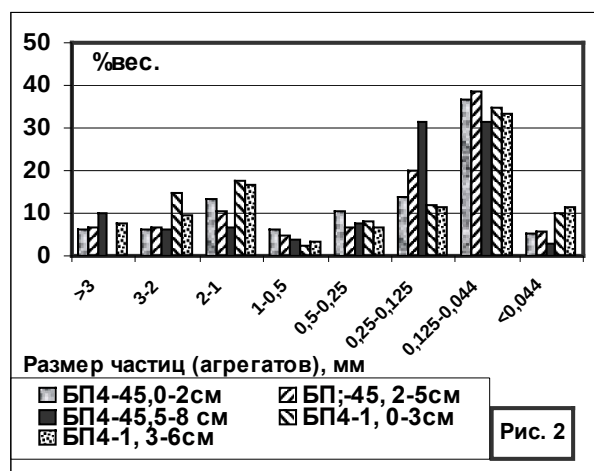
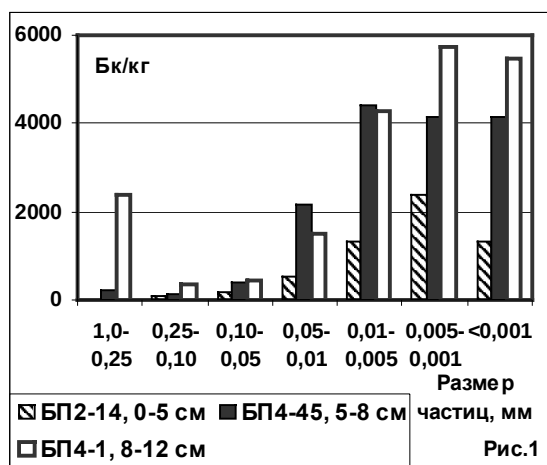


Рис.1 Распределение удельной активности ^{137}Cs в гранулометрических фракциях пойменного аллювия Балчугского участка

Рис.2 Агрегатный состав пойменных почв Балчугского участка по данным "сухого" ситования

Рис.3 Распределение удельной активности ^{137}Cs в агрегированных частицах пойменных почв.

2. В процессе формирования пойменных почв происходит агрегирование частиц - при "сухом" ситовании выделяются агрегаты размером более 1 мм (до 30 весовых % - рис.2). Агрегированные частицы состоят из ядер мономинерального состава, на котором прикрепляются более мелкие частицы глинистой фракции. В результате

распределение удельной активности ^{137}Cs в агрегированных частицах имеет равномерный характер (рис. 3). На наиболее представительные фракции, составляющие пойменные почвы суглинистого состава, приходится 40-60 % всей массы почвы, содержащей 35-47% общей активности ^{137}Cs .

3. Установленная закономерность распределения ^{137}Cs в гранулометрических фракциях почв предъявляет определенные требования к разработке технологии реабилитационных работ. При проведении восстановительных работ на радиоактивно загрязненных участках поймы необходимо учитывать, что значительную часть активности несут песчаные частицы сложного состава, которые необходимо разрушить, удалив с них минералы глинистой фракции, концентрирующие радионуклиды. По нашим данным [3], минералы глинистой фракции снимаются с более крупных частиц ультразвуковой вибрацией.

Для условий радиоактивного загрязнения поймы р.Енисей используется метод расчета МЭД, учитывающий толщину и активность загрязненного слоя (рис.1) и его перекрытие чистыми аллювиальными отложениями с учетом вклада в мощность экспозиционной дозы, помимо ^{137}Cs , излучения радионуклидов ^{60}Co и $^{152,154}\text{Eu}$.

Физические принципы расчетов. Исходной информацией для проведения таких расчетов являются данные о поверхностной активности радионуклидов в почве. Поскольку основным дозообразующим слоем почвы является слой толщиной в 30-40см [2] (это примерно слой толщиной в три длины свободного пробега (дсп) гамма-квантов с энергией 662кэВ, ^{137}Cs), в качестве исходной информации необходимы данные о распределении радионуклидов вдоль поверхности и по глубине. В соответствии с разработанной методикой для расчета МЭД в почве можно выделить два слоя толщиной L и Z (рис.1), первый из которых считается чистым (в нем отсутствуют радионуклиды), а второй содержит радионуклиды с равномерным распределением.

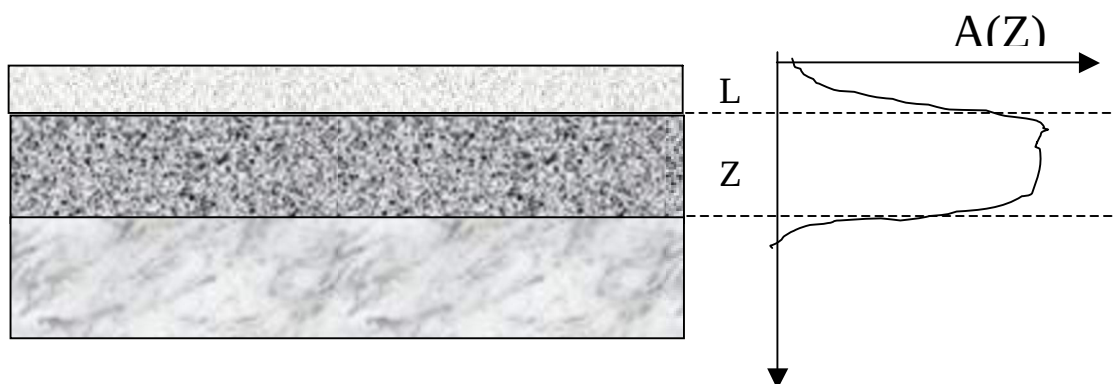


Рис.1. Модельное представление распределения радионуклидов в почве

Поверхность почвы разбивается на квадратные зоны заданного размера (см. рис.2). Размер зоны (квадрата) - a , как правило, определяется характерным размером неоднородностей поверхностного загрязнения почвы. Каждой зоне приписываются средние значения поверхностной активности радионуклидов, а характер распределения по глубине определяется заданием толщины слоев L и Z . МЭД над поверхностью почвы определяется, как правило, на высоте $h=1\text{м}$, т.к. она является характерным размером для оценки радиационной нагрузки на человека.

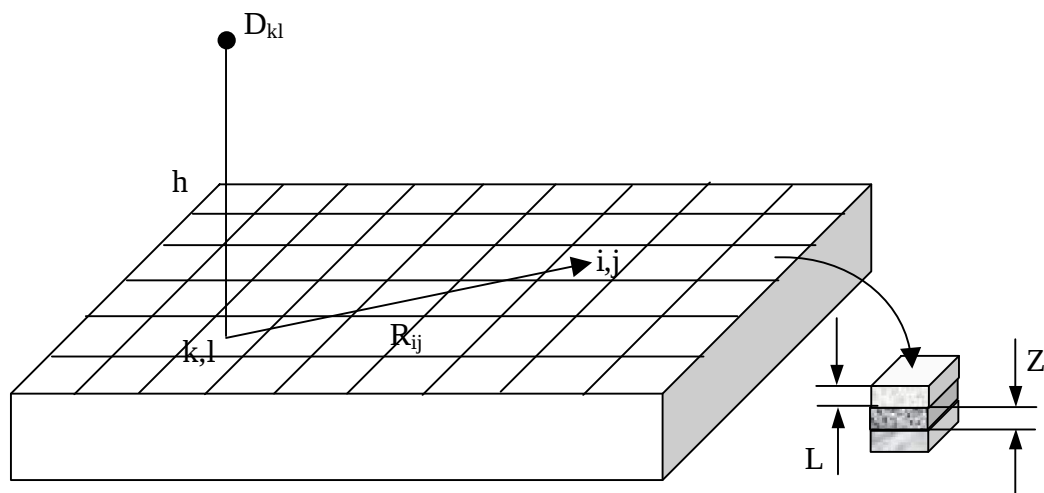


Рис.2 Схема, иллюстрирующая способ расчета МЭД над загрязненным участком территории

В силу аддитивного характера дозы излучения, ее мощность D_{kl} на высоте h над поверхностью зоны с индексом (k,l) будет определяться выражением (см. рис.2):

$$D_{kl} = D(z) \sum_{ij} A_{ij} K(L) \Delta F(R_{ij}, z) \Delta S_{ij} + D_{ERN}, \quad (1)$$

где $D(z) \Delta F(R_{ij}, z) \Delta S_{ij}$ - вклад в МЭД от элемента зоны с индексом (i,j) с единичной поверхностной активностью радионуклида равномерно заглубленного в слое толщины z , $\Delta S_{ij} = \pi r^2 / \pi [(R_{ij} + r)^2 - (R_{ij} - r)^2]$ и $r = \sqrt{a^2 / \pi}$. A_{ij} - поверхностная активность (i,j) -й зоны, D_{ERN} - фоновое значение МЭД естественных радионуклидов и космического излучения.

Величина $\Delta F(R_{ij}, z) = F(R_{ij} + r, z) - F(R_{ij} - r, z)$ определяется через функции, полученные предварительными расчетами методом Монте-Карло радиального распределения МЭД - $D(h, \rho, z)$ в горизонтальной плоскости на высоте h от цилиндрического источника единичной активности и площади поперечного сечения,

расположенного в почве. Эти предварительные данные о радиальном распределении МЭД - $D(h, \rho, z)$ дает информацию о двух функциях, используемых в расчетах:

$$F(R, z) = \int_R^{\infty} d\rho \rho D(h, \rho, z) / \int_0^{\infty} d\rho \rho D(h, \rho, z) \quad (2)$$

и

$$D(z) = 2\pi \int_0^{\infty} d\rho \rho D(h, \rho, z). \quad (3)$$

Вид функций $F(R, z)$ для двух предельных случаев заглубления радионуклидов $z = 0$ (тонкий пленочный источник) и $z = 3$ дсп показан на рис.3.

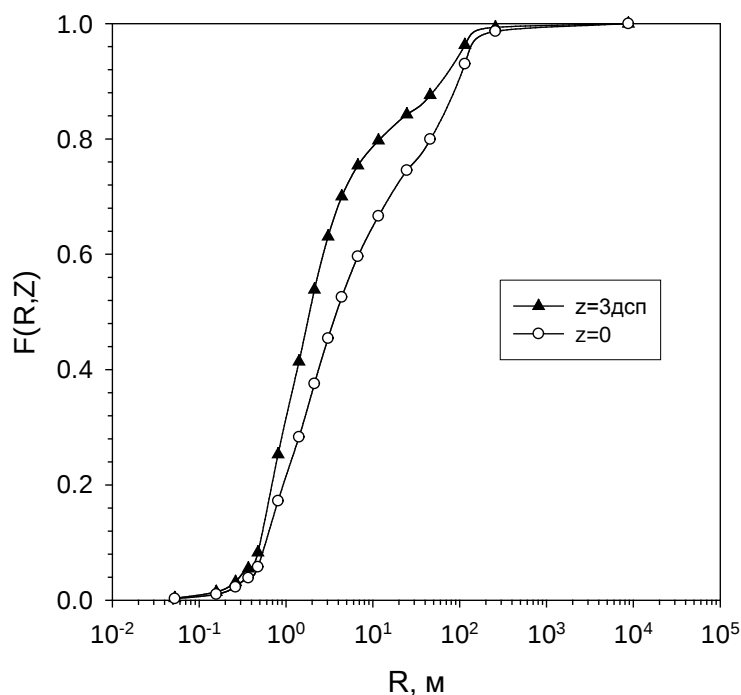


Рис.3 Вид функции $F(R, z)$, полученной для двух предельных значений толщины заглубления радионуклидов ^{137}Cs в почве.

Функция $D(z)$ имеет простой физический смысл – она определяет значение МЭД на 1м над бесконечно протяженным поверхностным источником единичной активности. Вид функции $D(z)$ определяется состоянием поверхности почвы: первое, когда поверхность идеально ровная (плоская) и второе, когда микрорельеф имеет впадины и западины [1]. Учет неровностей поверхности существенно влияет на величину этой функции для случаев небольшого заглубления ($<0,5$ дсп) радионуклидов.

Влияние чистого слоя почвы толщины L в этой модели расчета учитывается множителем $K(L)$, который имеет экспоненциальный вид:

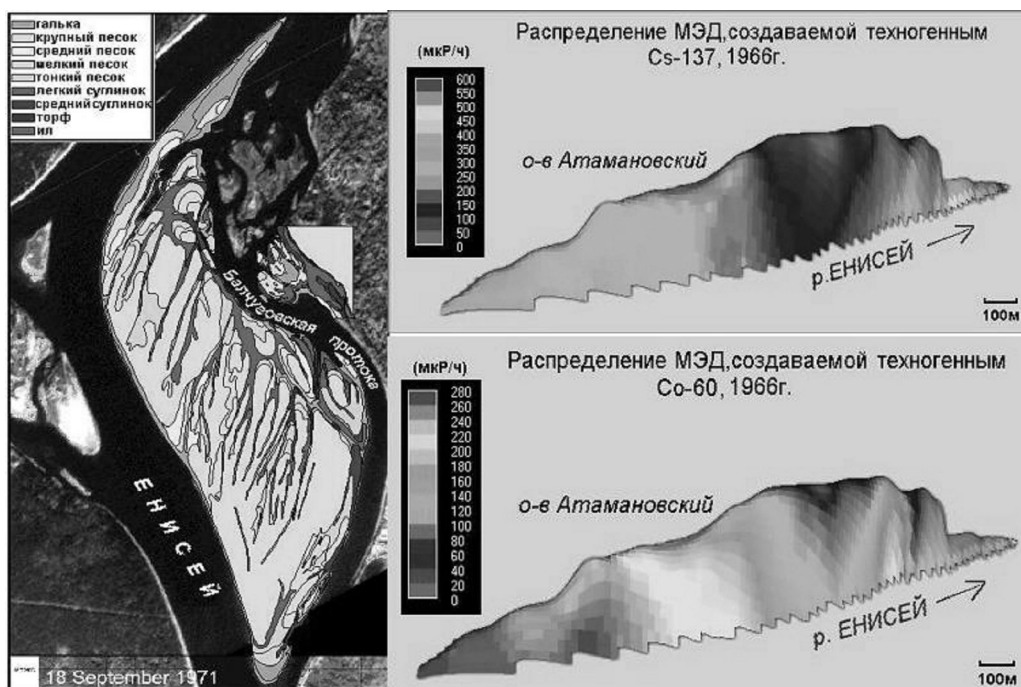
$$K(L) = \exp(-\alpha L), \quad (4)$$

где коэффициент α был определен на основании предварительного анализа данных монте-карловских расчетов, в которых учитывалось наличие верхнего чистого слоя почвы.

Таким образом, на основании предварительно полученных данных (функции (2) и (3)), с помощью выражения (1) рассчитывается МЭД в любой произвольной точке над поверхностью почвы.

Для получения наглядной картины (как статической, так и динамической) радиационного состояния поймы р.Енисей организуется система поддержки принятия решений (СППР). СППР включает несколько блоков: 1) визуализации баз данных о распределении техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды (почва, донные отложения, вода); 2) ГИС-моделирования современной и реконструированной радиационной обстановки в пойме р.Енисей.

ГИС-моделирование используется для построения карт загрязнения



техногенными радионуклидами как с помощью стандартных методов интерполяции, включая кригинг, так и обобщенные линейные и аддитивные модели, связывающие характеристики радионуклидного загрязнения с ландшафтными параметрами (высота над урезом воды, тип отложений). Данная методика построения карт радиационного

загрязнения используется для реконструкции дозовых нагрузок, что позволяет оценить интенсивность процессов самореабилитации в различных пойменных ландшафтах р.Енисей.

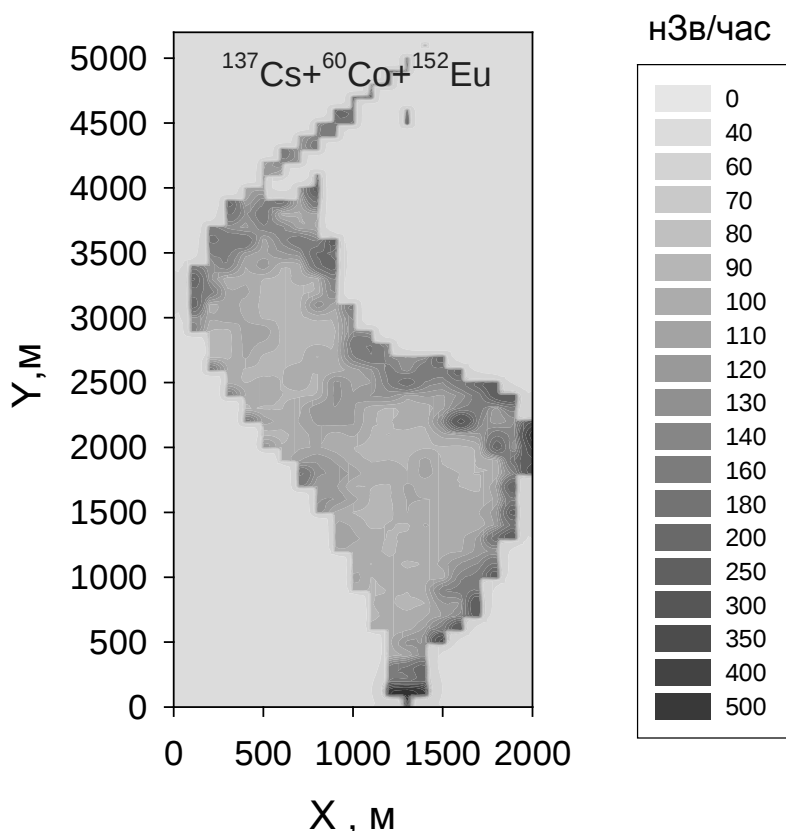


Рис.4. Распределение МЭД, создаваемой техногенными (^{137}Cs , ^{60}Co , $^{152,154}\text{Eu}$) и естественными радионуклидами, на острове Березовый.

В СППР реализованы возможности реконструкции радионуклидного загрязнения на примере о.Атамановский. Реконструкция загрязнения изотопами ^{137}Cs , ^{60}Co , $^{152,154}\text{Eu}$ по сетке 10x10 м дана на 1966 г. (максимальный паводок) и 1992 г. (время остановки реакторов на ГХК). Для условий радиоактивного загрязнения поймы р.Енисей используется метод расчета МЭД, учитывающий толщину и активность загрязненного слоя и его перекрытие чистыми аллювиальными отложениями с учетом вклада в мощность экспозиционной дозы, помимо ^{137}Cs , излучения радионуклидов ^{60}Co и $^{152,154}\text{Eu}$ [4]. Предложенная методика расчета МЭД была использована для реконструкции пространственного распределения дозовой нагрузки в 1966 г. на острове Атамановский, расположенном на удалении 8 км от места сброса стоков ГХК (рис.4).

Список литературы

- Линник В.Г., Волосов А.Г., Потапов В.Н., Савельев А.А., Соколов А.В., Соколов П.В., Сурков В.В. Ландшафтные принципы реабилитации радиационно загрязненных территорий. Создание системы поддержки принятия решений по организации реабилитационных мероприятий//Тезисы докладов Международного семинара «Проблемы очистки и реабилитации территорий, загрязненных радиоактивными материалами». Москва, 04-06 июня 2007 г. М.: ООО «Геоцентр Гроуп», 2007, с.72-77.
- Линник В.Г., Савельев А.А., Сурков В.В., Потапов В.Н., Соколов А.В., Соколов П.В., Волосов А.Г. Анализ пространственного распределения техногенных радионуклидов в пойменных ландшафтах р.Енисей в ближней зоне сбросов ГХК// Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Материалы XI Международной ландшафтной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2006. С.533-535.
- Linnik V.G., Brown J.E., Dowdall M., Potapov V.N., Nosov A.V., Surkov V.V., Sokolov A.V., Wright S.M., and Borghuis S. Patterns and inventories of radioactive contamination of island sites of the Yenisey River, Russia //Journal of Environmental Radioactivity Volume87, Issue 2, 2006, Pages 188-208.
- Линник В.Г., Сурков В.В., Потапов В.Н. Оценка современной динамики осадконакопления в пойме р.Енисей на основе ландшафтно-гидрологического, литологического и радиометрического анализа (на примере острова Черемухов)//Геоморфология. 2005. №С.42-51.
- Linnik V.G., Surkov V.V., Potapov V.N., Volosov A.G., Korobova E.M., Borghuis A., and Brown J.E. (2004) Lithological and geomorphological parameters of distribution of artificial radionuclides in the Yenisei floodplain landscapes//Russian Geology and Geophysics. Vol . 45. №10. P 1172-1187.
- Linnik V.G. et al., STREAM: Sediment facies maps. A Deliverable Report. Project ERB IC15-CT98-0219. September 2001. Ed. By J. Brown. Norwegian Radiation Protection Authority, p.64.
- Linnik V.G., Potapov V.N., Surkov V.V., Korobova E.M., Volosov A.G., Borghuis A., Brown J., Sokolov A.V., Martynova A.M., Savitsky Yu.V. Landscape-Radiometric Cross-Section Studies on Enisei River Islands//Proceedings from the 5th International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic. St. Petersburg, Russia, 16-20 June 2002, p.264-267.

Volosov A.G., Brown J. B., Korobova E.M., Linnik V.G., Borisov A.P., Krupskaya V.V., Chizhikova N.P., Bobrovitskaya N.N.. Granulometric composition of the flood plain soils and sediments in relation to the problem of the radionuclide contamination transport in the middle Yenisey. Advanced techniques and radionuclide speciation within radioecology. Poster presented at the International Conference on Radioactivity in the Environment, Monaco, 1-5 September 2002. In: P. Borretzen, T. Jolle, and P. Strand (Eds.) Proceedings, Published on CD-ROM.

Волосов А.Г., Линник В.Г., Коробова Е.М., Борисов А.П., Крупская В.В., Алексеева Т.А., Малышев Б.И. Распределение радионуклидов в гранулометрических фракциях пойменных почв р.Енисей//В сб.: Биогеохимическая индикация аномалий: Материалы V Биогеохимических чтений, посвященных памяти В.В. Ковальского (8 июня 2004 г.). Отв. Ред. В.В. Ермаков. М.: Наука, 2004. С.16-25.

Линник В.Г., Волосов А.Г., Потапов В.Н., Соколов А.В., Сурков В.В, Андрияшина С.Б. Разработка радиоэкологического кадастра для оценки радиационного загрязнения и реконструкции дозовых нагрузок в зоне влияния ГХК //Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы 2-ой Международной конференции. Томск. 2004. с.322-325.

Linnik V. G., Volosov A. G., Korobova E. M., Borisov A. P., Potapov V. N., Surkov V. V., Borghuis A., Brown J., and T. A. Alekseeva (2004) "Distribution of Technogenic Radionuclides in Alluvial Sediments and among Fractions of the Soil in the Near Zone of the Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine//Radiochemistry Vol.46. N5. pp. 508 –514.

Linnik V.G., Brown J.E., Dowdall M., Potapov V.N., Surkov V.V., Korobova E. M., Volosov A.G., Vakulovsky, S.M., Tertyshnik, E.G. Radioactive Contamination of the Balchug (Upper Enisey) Floodplain, Russia in Relation to Sedimentation Processes and Geomorphology//The Science of the Total Environment. Vol.339. Issue 1-3, 1 March 2005. P.233-251.

Линник В.Г., Волосов А.Г., Соколов А.В., Соколов П.В., Сурков В.В. Опыт разработки баз данных геоинформационных радиоэкологических кадастров долины р. Енисей//Сборник тезисов докладов Международной конференции "Моделирование процессов переноса радионуклидов в окружающей среде и вопросы разработки баз метаданных по радиационным объектам Советского ядерного комплекса. РАДЛЕГ-РАДИНФО-2005". Москва, 31 октября - 2ноября 2005. стр. 31.

Линник В.Г., Волосов А.Г., Лутковский В.В., Потапов В.Н., Соколов А.В., Соколов П.В., Сурков В.В. Разработка геоинформационных систем по анализу радиоэкологической обстановки в долине р. Енисей как основы системы принятия решений по реабилитации//Сборник тезисов докладов Международной конференции "Моделирование процессов переноса радионуклидов в окружающей среде и вопросы разработки баз метаданных по радиационным объектам Советского ядерного комплекса. РАДЛЕГ-РАДИНФО-2005". Москва, 31 октября - 2ноября 2005. стр.34.

Потапов В.Н., Соколов А.В., Линник В.Г., Сурков В.В. Оценка радиационного загрязнения и реконструкция дозовых нагрузок в зоне влияния ГХК с использованием ГИС-технологий//Сборник тезисов докладов Международной конференции "Моделирование процессов переноса радионуклидов в окружающей среде и вопросы разработки баз метаданных по радиационным объектам Советского ядерного комплекса. РАДЛЕГ-РАДИНФО-2005". Москва, 31 октября - 2ноября 2005. стр.16.

Волосов А.Г., Линник В.Г., Соколов А.В. Датирование новейших аллювиальных отложений поймы р.Енисей по соотношению радиоизотопов европия//Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма. Материалы III Российской конференции по изотопной геохронологии. 6-8 июня 2006 г., Москва, ИГЕМ РАН. Том 1. М.: ГЕОС, 2006. С.160-164.

Волосов А.Г., Линник В.Г., Коробова Е.М., Алексеева Т.Н., Борисов А.П. Распределение техногенных радионуклидов в гранулометрических фракциях аллювиальных отложений//Геохимия биосферы (к 90-летию А.И. Перельмана). Сборник докладов Международной научной конференции. Москва, 15-18 ноября 2006 г. Смоленск, Ойкумена, 2006. С.84-86.