

# INTEGRAL ANALYTICAL ESTIMATION OF THE NATURAL AND ANTHROPOGENIC TERRITORY SAFETY OF KRASNOYARSK REGION

*Anna M. Metus, Tatiana G. Penkova*

*Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

**Abstract:** The natural and anthropogenic territory safety is defined by a synergy of environmental and technosphere factors. This paper presents a comprehensive estimation of the natural and anthropogenic territory safety of Krasnoyarsk region based on the technique of integral analytical assessment. This technique provides the formation of the complex safety indicator and the calculation of an integrated assessment of the state of environment and technosphere objects.

*Keywords: natural and anthropogenic territory safety, integral analytical assessment, complex safety indicator, territory management.*

# ИНТЕГРАЛЬНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

*Метус А.М., к.т.н. Пенькова Т.Г*

Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск

Природно-техногенная безопасность территории определяется совокупностью факторов окружающей среды и техносферы. В работе выполнено оценивание состояния природно-техногенной безопасности территорий Красноярского края на основе метода интегрального аналитического оценивания, который позволяет сформировать комплексный показатель безопасности территории и рассчитать интегральную оценку комплексного показателя, являющуюся количественным выражением уровня безопасности.

*Ключевые слова: природно-техногенная безопасность, интегральное аналитическое оценивание, комплексный показатель, управление территориальной безопасностью.*

**Введение.** Одним из важнейших факторов защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций является стратегическое управление территориальной безопасностью [1], которое направлено на совершенствование деятельности подразделений, отвечающих за ликвидацию последствий ЧС, планирование мероприятий и разработку управляющих рекомендаций по уменьшению риска. Безусловной необходимостью в процессе стратегического управления является всесторонний анализ показателей безопасности территории, их временной и пространственной динамики, обеспечивающий информационно-аналитическую поддержку лиц, принимающих решения.

В условиях множественности сфер мониторинга и роста объема накапливаемых данных требуется применение методов комплексного оценивания безопасности территории. В настоящее время для оценивания состояния безопасности используется три основных подхода [2]. Вероятностный подход подразумевает построение математической модели риска. Методы данного типа используются для расчета индивидуальных, коллективных и социальных рисков и ориентированы, как правило, на конкретный производственный объект. Статистический подход позволяет формировать количественную оценку на основе анализа данных за определенный период наблюдения. Методы данного типа дают возможность объективно исследовать динамику изменений наблюдаемых параметров и формировать сводные показатели. Однако такие методы не могут быть применены для редко наблюдаемых событий и не позволяют получать интерпретации количественных оценок. Эвристический подход позволяет формировать качественные оценки, когда формальные методы слишком сложны, а исходная база данных недостаточна для получения однозначного аналитического решения. Однако применение методов данного типа без аналитической поддержки ведет к ошибкам субъективного характера. Таким образом, для оценивания природно-техногенной безопасности территории необходим комбинированный подход, позволяющий опираться на статистические наблюдения и учитывать экспертные знания о характере протекающих процессов.

В работе выполнен анализ состояния природно-техногенной безопасности территорий Красноярского края с использованием метода интегрального аналитического оценивания [3] на основе мониторинговых данных Главного управления МЧС России по Красноярскому краю. Метод обеспечивает формирование комплексного показателя на основе многомерного

аналитического моделирования состояния окружающей среды и объектов техносферы и позволяет получить интегральную оценку природно-техногенной безопасности территорий.

**Метод интегрального аналитического оценивания.** Общий подход к анализу состояния природно-техногенной безопасности территорий, согласно используемому методу, предусматривает формирование стандарта безопасности территории, а затем – интегральное оценивание состояния объектов окружающей среды и техносферы на основе разработанного стандарта.

Стандарт природно-техногенной безопасности территорий представляет собой территориально-ориентированную нормативную модель, множество переменных которой описывают «желаемый» уровень безопасности с учетом индивидуальных особенностей территории и реальных возможностей его достижения. На рисунке 1 представлена функциональная диаграмма формирования стандарта природно-техногенной безопасности в нотации IDEF0.

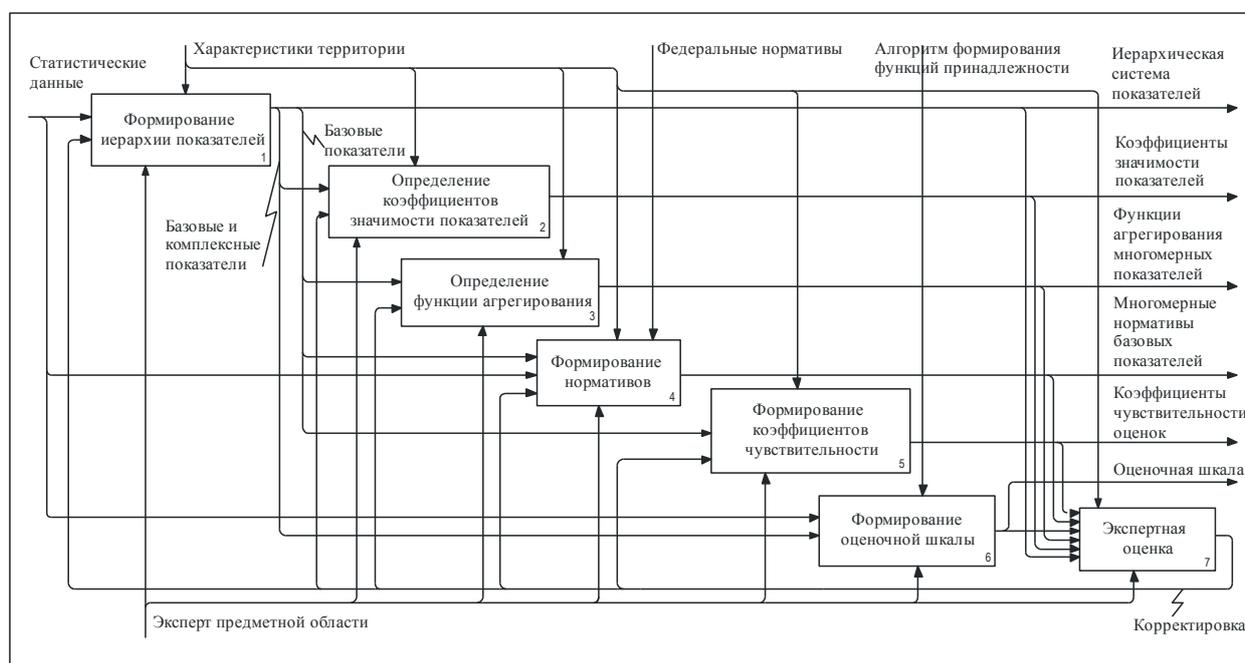


Рис. 1. Формирование стандарта безопасности территории.

На первом шаге формируется иерархическая система показателей – набор показателей, характеризующих природные и техногенные факторы риска возникновения чрезвычайных ситуаций [4]. Иерархия содержит два типа показателей: на нижнем уровне находятся базовые показатели, имеющие распределение по территории; на уровнях выше – комплексные, обобщенные по территории, показатели. На втором шаге определяются коэффициенты значимости показателей – весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад показателей нижнего уровня иерархии в показатели верхнего уровня. Коэффициенты значимости показателей определяются для каждой территории с учетом её физико-географических и социально-экономических особенностей. На третьем шаге определяются функции агрегирования оценок – функции, обеспечивающие переход от многомерных оценок показателей, рассчитанных по нескольким пунктам наблюдения, к одномерным значениям, рассчитанным по территории в целом. Функции агрегирования определяют, как отражается разброс оценок в пунктах наблюдений на оценке показателя территории. На четвертом шаге определяются нормативные значения показателей – интервалы значений, определяющих статистически

нормальную величину показателей с учетом их распределения по территории. На пятом шаге определяются коэффициенты чувствительности оценок – коэффициенты, регулирующие скорость изменения оценки при отклонении фактического значения показателя от установленного норматива. На шестом шаге формируется оценочная шкала – отображение количественного значения оценки в ее качественное выражение с использованием методов нечеткой логики. Для этого определяется лингвистическая переменная «Уровень безопасности», принимающая множество значений: «Улучшенный», «Хороший», «Приемлемый», «Удовлетворительный», «Пониженный», «Низкий», «Критический». Каждому значению лингвистической переменной ставится в соответствие значение оценки показателя, которое со 100% вероятностью соответствует данному значению лингвистической переменной и которое служит для определения вероятности принадлежности любого другого значения оценки этому значению переменной. В завершение выполняется экспертиза, в ходе которой проводится оценка адекватности сформированных параметров стандарта и необходимая корректировка.

На втором этапе метода проводится интегральное оценивание состояния природно-техногенной безопасности территории путем последовательного расчета оценок уровней иерархии показателей с применением выработанного стандарта. На рисунке 2 представлена функциональная диаграмма процессов оценивания состояния природно-техногенной безопасности территории.

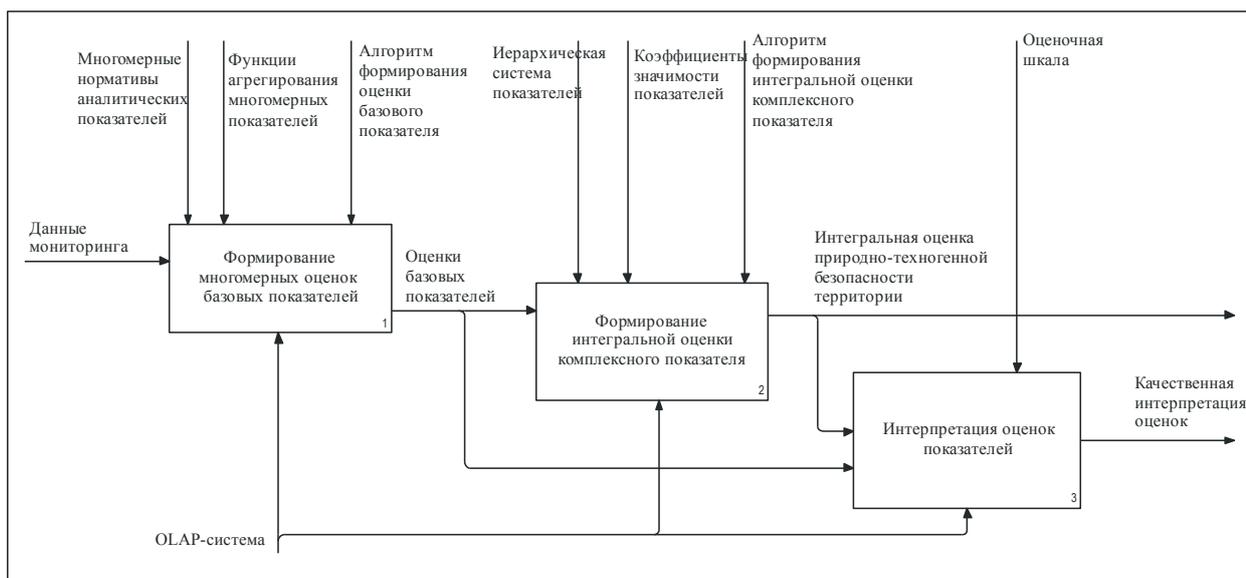


Рис. 2. Оценивание состояния природно-техногенной безопасности территории.

На первом шаге рассчитываются оценки показателей нижнего уровня иерархии – базовых показателей. Вначале рассчитываются многомерные оценки характеризующие соответствие показателя нормативу в разрезе отдельных пунктов наблюдения. Многомерные оценки рассчитываются следующим образом:

$$i_j^k = 1 + \Delta P_j^k S_j^k$$

где  $S_j^k = \pm 1$  – коэффициент, отражающий тенденцию  $k$ -го показателя в  $j$ -м пункте наблюдения, и принимает значение 1, если состояние безопасности улучшается при увеличении значения показателя, -1 в ином случае;  $\Delta P_j^k$  – коэффициент соответствия фактического значения  $k$ -го показателя нормативу в  $j$ -м пункте наблюдения. Коэффициент соответствия рассчитывается следующим образом:

$$\Delta P_j^k = \begin{cases} 0, & \text{если } P_j^k \in [N_j^k, Z_j^k] \\ \left( \frac{P_j^k - Z_j^k}{Z_j^k - N_j^k} \right)^{q_k}, & \text{если } P_j^k > Z_j^k \\ - \left( \frac{N_j^k - P_j^k}{Z_j^k - N_j^k} \right)^{q_k}, & \text{если } P_j^k < N_j^k \end{cases}$$

где  $q_k$  – коэффициент чувствительности оценки к отклонению  $k$ -го показателя от норматива, заданный в стандарте безопасности;  $[N_j^k, Z_j^k]$  – диапазон нормативных значений  $k$ -го показателя в  $j$ -м пункте наблюдения;  $P_j^k$  – фактическое значение  $k$ -го показателя в  $j$ -м пункте наблюдения. Значение коэффициента  $\Delta P_j^k$  в совокупности со значением коэффициента  $S_j^k$  позволяют получить количественную оценку  $i_j^k$  показателя. Значения оценки  $i_j^k$ , превышающие единицу, демонстрируют улучшение показателя.

Затем, проводится агрегация многомерных оценок базовых показателей по территории:

$$I_k = f_{agr}^k(i_1^k, \dots, i_m^k)$$

где  $i_j^k, j \in \{1 \dots m\}$  – многомерная оценка  $k$ -го базового показателя в  $j$ -м пункте наблюдения,  $f_{agr}^k$  – функция агрегирования для  $k$ -го базового показателя, заданная в стандарте безопасности.

На втором шаге рассчитывается интегральная оценка комплексного показателя на основе оценок базовых показателей с учетом их значимости в показателе верхнего уровня иерархии:

$$I_\Sigma = \sum_{k=1}^n u_k I_k$$

где  $I_\Sigma$  – интегральная оценка комплексного показателя;  $I_k$  – оценка  $k$ -го базового, или промежуточного комплексного, показателя по территории,  $u_k$  – коэффициент значимости  $k$ -го базового показателя, заданный в стандарте безопасности.

На третьем шаге проводится интерпретация количественного значения оценок показателей с помощью шкал, заданных в стандарте безопасности, следующим образом:

$$\mu_i = \frac{1}{\sum_{k=1}^C \left( \frac{\|x - c_j\|}{\|x - c_k\|} \right)^2}$$

где  $\mu_i$  – функция принадлежности  $i$ -го значения лингвистической переменной,  $c_i$  – значение оценки показателя, которое со 100% вероятностью соответствует  $i$ -му значению лингвистической переменной,  $c_k$  – значение оценки показателя, которое со 100% вероятностью соответствует  $k$ -му значению лингвистической переменной,  $x$  – текущее значение оценки показателя,  $C = 7$  – число значений лингвистической переменной. Значением функции принадлежности будет вероятность, с которой данное значение оценки показателя соответствует  $i$ -му значению лингвистической переменной.

Таким образом, метод интегрального аналитического оценивания позволяет сформировать комплексный показатель природно-техногенной безопасности, имеющий иерархичную структуру, рассчитать интегральную оценку комплексного показателя, являющуюся количественным выражением уровня безопасности и провести ее качественную интерпретацию.

**Интегральное аналитическое оценивание состояния безопасности территорий Красноярского края.** Территория Красноярского края характеризуется повышенным уровнем чрезвычайных ситуаций, во многом определяющимся социально-экономическими причинами, большим ресурсным потенциалом, географическим положением и климатическими условиями. По данным Государственного доклада Главного управления МЧС РФ по Красноярскому краю за 2017 год [5], на территории региона расположено большое количество потенциально опасных объектов техносферы как регионального, так и федерального значения, большое количество объектов жизнеобеспечения, включая котельные, водозаборы, очистные сооружения. Территория края занимает более 1 млн. кв. км. и расположена в семи климатических зонах. Крупные ЧС природного характера фиксируются практически ежегодно.

Для всех территорий Красноярского края сформирован стандарт природно-техногенной безопасности [6]. Часть стандарта безопасности приведена в таблице 1. Оценивание природно-техногенной безопасности территорий Красноярского края осуществляется в разрезе территорий по различным сферам мониторинга. В качестве примера рассмотрим формирование интегральной оценки комплексного показателя «Пожарная обстановка» городского округа г. Красноярск, в состав которого входят населенные пункты г. Красноярск и д. Песчанка.

Таблица 1. Стандарта природно-техногенной безопасности территорий Красноярского края

| Иерархия показателей   | Коэффициент чувствительности,<br>$q_k$ | Нижняя граница норматива,<br>$N_k$ | Верхняя граница норматива,<br>$Z_k$ | Коэффициент значимости,<br>$u_k$ |
|--|--|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
|  | <b>г. Красноярск</b>                   |                                    |                                     |                                  |
| 1. Техногенная безопасность  |  |                                    |                                     | 0,8                              |
| 1.1 Обстановка на объектах техносферы  |  |                                    |                                     | 0,35                             |
| 1.2 Транспортная обстановка  |  |                                    |                                     | 0,3                              |
| 1.3 Обстановка на объектах ЖКХ   |  |                                    |                                     | 0,1                              |
| 1.4 Пожарная обстановка  |  |                                    |                                     | 0,1                              |
| Количество бытовых и производственных пожаров на 10000 населения, $\times 10^{-8}$ | 1,0                                    | 0                                  | 2,520                               | 0,4                              |
| Количество пожаров с погибшими на 10000 населения, $\times 10^{-8}$                | 0,3                                    | 0,012                              | 0,036                               | 0,3                              |
| Количество пожаров с пострадавшими на 10000 населения, $\times 10^{-8}$            | 0,8                                    | 0,005                              | 0,041                               | 0,3                              |
| 1.5 Радиационная обстановка  |  |                                    |                                     | 0,15                             |
| 2. Природная безопасность  |  |                                    |                                     | 0,2                              |
| 2.1 Метеорологическая обстановка   |  |                                    |                                     | 0,3                              |
| 2.2 Гидрологическая обстановка   |  |                                    |                                     | 0,2                              |
| 2.3 Геофизическая обстановка   |  |                                    |                                     | 0,3                              |
| 2.4 Лесопожарная обстановка  |  |                                    |                                     | 0,2                              |

На первом этапе рассчитываются оценки базовых показателей пожарной обстановки – определяются многомерные оценки (в разрезе двух пунктов наблюдения – г. Красноярск и д. Песчанка) и выполняется их агрегирование по всей территории – городскому округу г. Крас-

ноярска. Фактические значения показателя «Количество бытовых и производственных пожаров на 10000 населения» для г. Красноярска составляет  $P_{1.4.1} = 3,721$ , для д. Песчанка –  $P_{1.4.1} = 1,346$ . Поэтому, коэффициент соответствия для г. Красноярск рассчитывается по условию выхода за верхнюю границу норматива:  $\Delta P_{1.4.1} = ((3,721 - 2,52)/2,52)^1 = 0,48$ ; для д. Песчанка коэффициент рассчитывается по условию выхода за нижнюю границу норматива:  $\Delta P_{1.4.1} = -((1,882 - 1,346)/(7,54 - 1,882))^1 = -0,09$ . Далее, с учетом полярности показателя, оценка для г. Красноярска составляет  $i_{1.4.1} = 1 + 0,48(-1) = 0,52$ , для д. Песчанка –  $i_{1.4.1} = 1 + (-0,09)(-1) = 1,09$ . Аналогично, для показателя «Количество пожаров с погибшими на 10000 населения» оценки составляют:  $i_{1.4.2} = 0,43$  для г. Красноярска и  $i_{1.4.2} = 1,84$  для д. Песчанка, для показателя «Количество пожаров с пострадавшими на 10000 населения» – для  $i_{1.4.3} = 0,44$  и  $i_{1.4.3} = 2,38$  соответственно.

Агрегированные оценки базовых показателей рассчитываются исходя из наихудших значений, зарегистрированных в отдельных пунктах наблюдения. Так, оценка базового показателя «Количество бытовых и производственных пожаров на 10000 населения» составляет  $I_{1.4.1} = \min(0,52; 1,09) = 0,52$ . Оценки базовых показателей «Количество пожаров с погибшими на 10000 населения» и «Количество пожаров с пострадавшими на 10000 населения» составляют –  $I_{1.4.2} = 0,43$  и  $I_{1.4.3} = 0,44$  соответственно.

На втором этапе рассчитывается интегральная оценка комплексного показателя «Пожарная обстановка» по городскому округу г. Красноярска на основе коэффициентов значимости входящих в него показателей. Оценка комплексного показателя «Пожарная обстановка» составляет  $I_{\text{Пожар}} = 0,4 * 0,52 + 0,3 * 0,43 + 0,3 * 0,44 = 0,47$ . Аналогичным образом рассчитываются остальные комплексные показатели: «Обстановка на объектах ЖКХ» –  $I_{\text{ЖКХ}} = 0,43$ ; «Транспортная обстановка» –  $I_{\text{Трансп.}} = 1,0$ ; «Обстановка на объектах техносферы» –  $I_{\text{Техносф.}} = 1,23$ ; «Радиационная обстановка» –  $I_{\text{Радиаци.}} = 1,0$ ; «Лесопожарная обстановка» –  $I_{\text{Лесопожар.}} = 1,05$ ; «Геофизическая обстановка» –  $I_{\text{Геофизич.}} = 1,0$ ; «Гидрологическая обстановка» –  $I_{\text{Гидролог.}} = 1,0$ ; «Метеорологическая обстановка» –  $I_{\text{Метеор.}} = 1,17$ .

Комплексные показатели более высокого уровня рассчитываются на основе коэффициентов значимости комплексных показателей нижнего уровня: «Техногенная безопасность» –  $I_{\text{Техног.}} = 0,47 * 0,1 + 0,43 * 0,1 + 1 * 0,3 + 1,23 * 0,35 + 1 * 0,15 = 0,97$ ; «Природная безопасность» –  $I_{\text{Природ.}} = 1,05 * 0,2 + 1 * 0,3 + 1 * 0,2 + 1,17 * 0,3 = 1,06$ ; «Природно-техногенная безопасность» –  $I_{\text{Природ.техног.}} = 0,97 * 0,8 + 1,06 * 0,2 = 0,99$ .

Рассмотрим процесс интерпретации оценки на примере показателя «Природно-техногенная безопасность». Оценочная шкала для данного показателя представлена в таблице 2, где  $l_i$  представляет значения лингвистической переменной «Уровень природно-техногенной безопасности»,  $c_i$  – значения показателя «Природно-техногенная безопасность», которые со 100% вероятностью соответствуют значению переменной,  $\mu_i$  – значения функции принадлежности оценочной шкалы. Значение оценки г. Красноярска  $I_{\text{Природ.техног.}} = 0,99$  характеризуется как улучшенный уровень природно-техногенной безопасности территории.

Таблица 2. Оценочная шкала комплексного показателя природно-техногенной безопасности

|  | $l_i$ | $c_i$ | $\mu_i$ |
|--|-------|-------|---------|
|--|-------|-------|---------|

|   |                    |                 |             |
|---|--------------------|-----------------|-------------|
| 1 | Улучшенный         | 0.9093267666288 | 0,986412206 |
| 2 | Хороший            | 0.8136647929115 | 0,008926737 |
| 3 | Приемлемый         | 0.7275432132811 | 0,002325299 |
| 4 | Удовлетворительный | 0.6561627709198 | 0,00114636  |
| 5 | Пониженный         | 0.6003893396118 | 0,0         |
| 6 | Низкий             | 0.4804927665189 | 0,0         |
| 7 | Критический        | 0.1016071897181 | 0,0         |

Аналогично выполнен расчет и интерпретация оценок иерархии показателей для остальных территорий Красноярского края. Пространственная динамика уровня природно-техногенной безопасности по территориям края показана на рисунке 3.

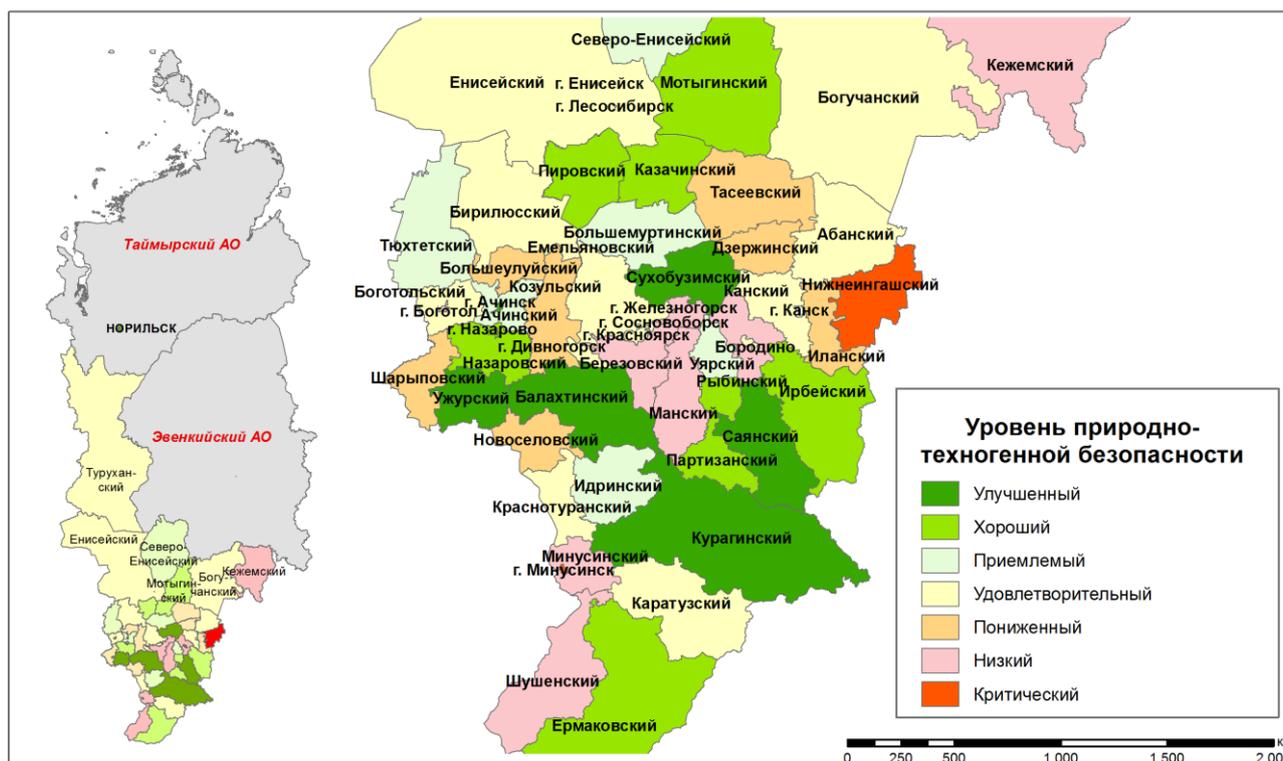


Рис. 3. Уровни природно-техногенной безопасности территорий Красноярского края

Наиболее высокий уровень природно-техногенной безопасности демонстрируют такие районы как Сухобузимский, Ужурский, Саянский, а так же города Енисейск, Лесосибирск, Красноярск. К территориям с наиболее низким уровнем природно-техногенной безопасности относятся Нижнеингашский район и город Минусинск, что обусловлено неблагоприятными значениями показателя «Количество аварий на системах водоснабжения на 10000 чел. населения» в г. Минусинске и показателями «Количество аварий на системах электроснабжения на 10000 чел. населения», «Количество бытовых и производственных пожаров на 10000 чел. населения» в населенных пунктах Нижнеингашского района.

**Заключение.** Выполнен анализ состояния природно-техногенной безопасности территорий Красноярского края с использованием метода интегрального аналитического оценивания. Представлены этапы формирования стандарта безопасности, учитывающего индивидуальные особенности территории, приведен алгоритм расчета интегральной оценки состояния безопасности на основе сформированного стандарта, являющийся количественным выраже-

нием уровня безопасности, приведен процесс интерпретации интегральной оценки, позволяющий получить качественную интерпретацию интегральной оценки. Полученные оценки состояния территорий служат в качестве информационно-аналитической поддержки в процессе стратегического управления территориями.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ямалов И.У.* Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций. М.: Лаборатория базовых знаний, 2013. 288 с.
- [2] *Метус А.М.* Актуальные задачи комплексного оценивания природно-техногенной безопасности территории // Молодой ученый. 2015. № 11. С. 89-92.
- [3] *Пенькова Т.Г., Метус А.М., Ничепорчук В.В.* Метод интегрального аналитического оценивания природно-техногенной безопасности территорий (на примере Красноярского края) // Проблемы анализа риска. 2018. Т.15, № 5. С. 16-25.
- [4] *Ничепорчук В.В., Пенькова Т.Г.* Система аналитических показателей для стратегического контроля природно-техногенной безопасности территорий // Проблемы анализа риска. 2018. Т. 15, №1. С. 70-77.
- [5] Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Красноярского края от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Главное управление МЧС России по Красноярскому краю в 2017 году. Красноярск, 2018. 248 с.
- [6] *Ничепорчук В.В., Пенькова Т.Г., Метус А.М.* Формирование стандарта природно-техногенной безопасности территорий Красноярского края // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2018. № 2. С.41-52.