

УДК 625.111

Спасская Ксения Андреевна

ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»
Россия, Хабаровск¹

Аспирантка кафедры «Железнодорожный путь и проектирование железных дорог»
E-Mail: university_work@mail.ru

Критерии выбора варианта направления трассы железной дороги, учитывающие развитие оползневых процессов

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, связанные с выбором принципиальных направлений трассы новой железной дороги между известными опорными пунктами. Модель множества возможных вариантов направлений, представленных в виде сочетания опорных пунктов и фиксированных точек, описана на основе теории графов.

При проектировании железных дорог применяют принцип вариантности для сравнительной оценки по показателям эффективности того или иного проектного решения. Чаще всего стоимостные показатели играют ключевую роль при решении задачи выбора варианта. Получение оптимального варианта маловероятно на основе сравнения по единственному критерию, таким образом, отбор рациональных вариантов направления из множества возможных является задачей многокритериальной оптимизации.

Учитывая тот факт, что перспективными территориями для строительства новых железных дорог являются зоны Севера, Дальнего Востока, Восточной Сибири, характеризующиеся малой освоенностью и сложными природными условиями, в том числе возникновением и развитием различных экзогенных процессов, становится необходимым выделение критериев, учитывающих специфику местности. Недостаточная изученность местных условий может в итоге негативно сказаться на качестве принимаемых проектных решений, привести к увеличению сроков и стоимости строительства сооружения, а также появлению барьерных мест и аварийных ситуаций во время эксплуатации.

В данной работе предлагается в качестве дополнительных критериев отбора использовать оценку риска оползневой опасности и величину возможного экономического ущерба при наступлении оползневого события.

Ключевые слова: новые железные дороги; направление трассы; критерий; теория графов; космическая фотосъемка; прогноз оползневой опасности; картирование; экономические потери; устойчивость склонов.

Идентификационный номер статьи в журнале 92TVN314

¹ 680021, ул. Серышева, 47

Основой для выбора варианта направления трассы традиционно являются материалы изысканий прошлых лет, архивные данные. На сегодняшний день, эффективность изыскательских работ значительно повышается за счёт использования материалов как традиционной аэрофотосъёмки, так и космической съёмочной информации, а получение дополнительных сведений положительно влияет на качество принятия решений на всех стадиях проектирования и функционирования сооружения.

Космофотосъёмка с последующим дешифрированием позволяет в относительно короткие сроки получить широкий спектр информации, дополняющей материалы инженерно – геодезических, инженерно – геологических изысканий, а также некоторые уникальные данные о гидрологии, геоморфологии, ландшафте и сложных условиях местности, которые невозможно получить традиционными методами. Наряду с вышесказанным, неоспоримым плюсом является возможность динамического отслеживания и прогнозирования ряда процессов, имеющих различное происхождение.

Результатом дешифрирования космофотоснимков является получение комплекса карт, включающих в себя анализ и некоторую оценку условий местности на основе ландшафтно – индикационного метода. Такие тематические карты могут содержать информацию о разломах земной коры, активности экзогенных процессов (оползней, обвалов, селей и т. д.), направлении поиска месторождений и подземных вод, гидрографической сети и водосборах, границах снежного покрова, деятельности поверхностных вод, наледообразованию и другие.

При выборе и обосновании основных вариантов важную роль играет устойчивость склонов, вблизи которых возможно прохождение трассы. Гравитационные процессы на склонах и откосах земляного полотна, возникающие вследствие воздействия разнообразных природных и антропогенных факторов, представляют собой нарушение равновесия земляных масс и вызывают потерю устойчивости. Оползни представляют собой одну из весьма распространённых форм нарушения, которая встречается на сети железных дорог.

Для учёта и предотвращения возможного неблагоприятного, разрушающего воздействия оползневых процессов на комплекс железнодорожных сооружений необходимо выполнение прогноза оползневой опасности. Прогноз представляет собой обобщение и анализ сведений о вероятности проявления, активизации и распространения оползней, получение которых возможно на основе выявления факторов, способствующих оползнеобразованию. В зависимости от целей, а также полноты исходной информации, выделяют региональный и локальный прогноз [6], [10].

Большое значение для понимания процессов формирования и прогноза оползневой опасности имеет классификация оползней, которая, применительно к оползневым процессам, представляет собой довольно обширную область знаний. Наиболее распространены в этой области работы таких учёных как Г. С. Золотарёв, В. Д. Ломтадзе, Е. П. Емельянова и т. д. Как отмечается в работе [10], наиболее популярными является генетическая классификация оползней, которая предполагает разделение оползневых процессов по происхождению и механизму движения. Как представляется автору данной работы, при выполнении регионального прогноза оползневой опасности важно соотнести факторы влияющие на оползнеобразование с принятой классификацией, осуществление такого подхода возможно при использовании специализированных геоинформационных систем. Такая связь позволит более детально отследить возникновение и динамику развития оползня в пространстве. За основу можно принять классификацию Г. С. Золотарёва [2], получившую широкое распространение. Классификация склоновых процессов приведена в таблице 1.

Таблица 1

Классификация склоновых оползневых процессов по Г. С. Золотарёву [2]

Группа	Подгруппа	Типы и виды
Оползневые - отчленение и скольжение пород разного состава, сложения, состояния и объёмов по подготовленной или вновь формируемой поверхности (зоне) разной формы и толщины, с различным характером деформаций пород	Выдавливания (детрузивные)	Оползни блокового строения прочных пород с деформациями ползучести в глинистых и плавунных песчаных грунтах, а также в зонах тектонических нарушений;
	Консеквентные	Оползни скольжения блокового строения со смещениями по имеющимся в массиве поверхностям и зонам ослабления
	Вязкопластичные (деляпсивные); с преобладанием сдвиговых и частично пластических деформаций водонасыщенных обломочно - глинистых масс	Оползни-потоки и сплывы; Оползни "внезапного" разжижения лёссовых и малолитифицированных ("подвижных") глин;
	Сложные и переходные	Консеквентно - детрузивные; Сейсмически возбуждённые потоки и лавины; Деляпсивно - детрузивные с большой энергией;

Основными факторами, влияющими на возникновение, активизацию, развитие и распространение оползней по мнению многих авторов, исследовавших данный вопрос, являются:

- тектоническая раздробленность территории, наличие разломов;
- рельеф и экспозиция склона;
- метеорологические особенности, режим и объем атмосферных осадков;
- наличие и режим подземных вод;
- характер распространения и тип растительности;
- обводненность территории, расположение постоянных водотоков;
- процессы выветривания;
- наличие и характер трещин на поверхности склона;
- сейсмическое воздействие;
- антропогенный фактор.

Характеристика большей части перечисленных факторов может быть получена по результатам дешифрирования уже упомянутой ранее космофотосъёмки с последующим

составлением тематических карт, для конкретных условий местности приведённый список может быть скорректирован.

Для обработки и представления вышеперечисленных данных невозможно обойти вниманием геоинформационные технологии и системы. Применение геоинформационных систем подразумевает особый вид представления данных, в особенности для целей проектирования, в связи с этим, необходимо наличие адаптированной методики визуализации и построения информационных моделей данных применительно к проектированию железных дорог с учётом нескольких критериев, а именно – специализированных цифровых карт.

Для получения карт оползневой опасности при выборе вариантов направления трассы железной дороги предлагается применять полуколичественный метод, включающий в себя элементы балльной экспертной оценки и вероятностных подходов, предложенный в рекомендациях к оценке оползневой опасности на автомобильных дорогах² и работе [10] с некоторыми уточнениями автора статьи. Принципиальная схема, демонстрирующая составление тематической карты оползневой опасности показана на рисунке 1.

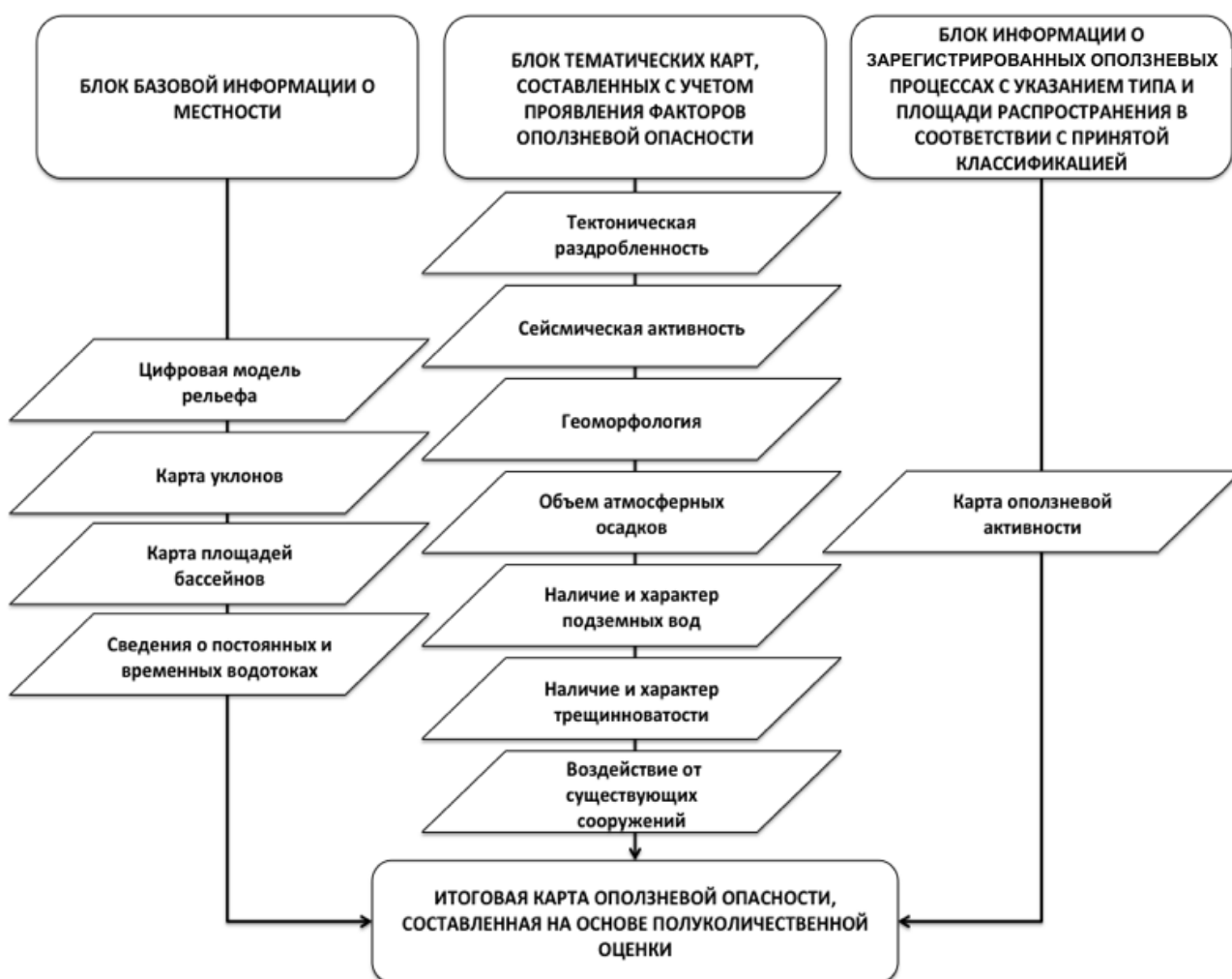


Рис. 1. Схема к составлению тематической карты оползневой опасности (составлена автором)

² ОДМ 218.2.030-2013 Методические рекомендации по оценке оползневой опасности на автомобильных дорогах

Значение оползневой опасности может быть получено путём суммирования либо произведения частных оценок. Интегральные формулы могут принимать вид:

$$R_o^{\Sigma} = \sum_{f=1}^F K_{cf} \cdot c_f, \quad (1)$$

$$R_o^{\Pi} = \prod_{f=1}^F K_{cf} \cdot c_f, \quad (2)$$

где F - количество факторов; R_o – оползневая опасность; K_{cf} – коэффициент значимости f -го фактора оползневой опасности; c_f – балльное значение f -го фактора по принятой шкале.

Весовой коэффициент, учитывающий степень влияния фактора на смещение может принимать значения от 0 до 1, при этом веса нормируются таким образом, чтобы их сумма равнялась 1. Качественные характеристики вероятности могут быть соотнесены со значениями некоторых опытных данных, например на основании функции распределения выявленных оползней по классам факторов. Пример экспертной оценки оползневой опасности на основе балльной шкалы приведён в таблице 2.

Таблица 2

Пример балльной шкалы оценки оползневой опасности
(составлена автором на основе работы [6])

Фактор f	Возможные значения интенсивности проявления фактора	Оценочный балл c_f	Вероятность активизации оползня в результате действия фактора	Весовой коэффициент значимости K_{cf}
Тектоническая раздробленность	не выявлено	0	высокая	0,24
	слабая	1		
	средняя	2		
	выше среднего	3		
Сейсмическое воздействие, баллы	сильная	4	выше среднего	0,18
	менее 6	0		
	7	1		
	8	2		
Наличие и распространение подземных вод	9	3	высокая	0,23
	более 9	4		
	не выявлено	0		
	слабое	1		
Выветривание	среднее	2	низкая	0,06
	выше среднего	3		
	сильное	4		
	отсутствует	0		
Трещиноватость	незначительная	1	выше среднего	0,17
	средняя	2		
	выраженные трещины отрыва	3		
	4	4		

Для оценки риска оползневой опасности и выражения приближенных экономических потерь на некотором участке трассы железной дороги, необходимо установить возможные последствия с учётом проведённого анализа возникновения оползневой ситуации на основе качественной характеристики, которая должна быть соотнесена со значением в зависимости от принятой шкалы и значения интегральной оценки, полученной путём суммирования частных. Пример качественной характеристики последствий оползневого смещения приведён в таблице 3.

Таблица 3

**Пример качественной характеристики последствий
 оползневого смещения по категориям**
(составлена автором)

Обозначение категории	Интегральная оценка оползневой опасности	Качественная характеристика	Описание
S1	$3 < R_o^\Sigma \leq 4$	Катастрофический	Полное разрушение участка дороги, полная остановка движения в течении длительного периода времени, возможен сход состава с рельс
S2	$2 < R_o^\Sigma \leq 3$	Крупный	Значительная часть земляного полотна и основных конструкций железнодорожного пути повреждена, движение остановлено, нарушен график движения поездов, после восстановления движения установлено ограничение скорости
S3	$1 < R_o^\Sigma \leq 2$	Средний	Разрушена небольшая часть земляного полотна, движение остановлено на короткий промежуток времени, восстановление движения возможно в разумные сроки, на участке устанавливается ограничение скорости
S4	$R_o^\Sigma \leq 1$	Малый	Незначительно повреждено земляное полотно и конструкция железнодорожного пути, движение поездов не прекращается, установлено ограничение скорости на участке
S5	$R_o^\Sigma \approx 0$	Незначительный	Ущерб незначителен, не препятствует движению, устраняется в кратчайшие сроки, ограничение скорости движения не требуется

Количественное выражение экономического риска при активизации оползневого процесса для оценки варианта направления трассы может быть определено для каждой категории последствий и представлено в следующем виде:

$$R_e = \sum_{s=1}^S P_n \cdot P_c \cdot D_e, \quad (3)$$

где S – количество участков, входящих в вариант направления трассы; R_e – полный риск потерь от реализации оползневой опасности, руб./год; P_n – повторяемость оползневого события в пределах территории, вблизи которой может проходить участок направления трассы, случаев/год; P_c – вероятность поражения оцениваемого объекта в пространстве; D_e – возможные экономические потери, укрупнённо учитывающие суммарную стоимость ремонтных работ на s -ом участке длиной l , возможное увеличение эксплуатационных затрат и упущенных доход из-за остановки движения либо ограничения скорости, руб.

Величина возможных экономических потерь может быть установлена в зависимости от категории последствий оползневого смещения на основе статистической информации, полученной с действующих участков существующих железнодорожных магистралей, на которых были зафиксированы оползневые процессы.

В математическом отношении, множество возможных направлений трассы между заданными опорными пунктами, представляющее собой сеть, может быть представлено в виде графа $G = \{E, V\}$, где $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ – множество узлов сети (опорные пункты либо фиксированные точки); $V = \{v_{ij}\}$ – множество рёбер (прямые участки возможной железнодорожной линии, соединяющие смежные узлы e_i и e_j). Рёбра данного графа, представляющие собой отдельные участки возможных направлений трассы, должны иметь соответствующую ориентацию, а также *вес*, соответственно граф $G = \{E, V\}$ будет являться ориентированным и взвешенным, а также ациклическим.

Каждое из возможных направлений будет представлять собой путь, состоящий из упорядоченной последовательности рёбер, которая начинается в e_1 и заканчивается в e_n . Все возможные направления, а значит и пути, можно обозначить множеством $N_{ij} = \{h_{ij}^k\}$. Каждый путь η_{ij}^k ($k = \overline{1, K}$), k - порядковый номер пути (варианта направления), необходимо обозначить списком рёбер, входящих в данный путь:

$$\eta_{ij}^k = \eta_{ip}, \eta_{ps}, \eta_{sd}, \dots, \eta_{hj} = v_{ip}, v_{ps}, v_{sd}, \dots, v_{hj} \quad (4)$$

Каждому ребру графа (участку направления железнодорожной линии) можно присвоить ранг, т. е. значение соответствующих критериев (степень оползневой опасности и/или величину возможных экономических потерь). Сумма весов рёбер будет представлять собой длину пути. Пусть в качестве критерия принята величина экономического риска, тогда вес ребра и длина пути могут быть определены по следующим формулам:

$$R_e^m = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Hi} \cdot P_{Si} \cdot D_{ei} \cdot l_i}{L_m^y}, \quad (5)$$

$$R_e^k = \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{i=1}^n R_{ei} \cdot l_i}{L_m^y}, \quad (6)$$

где R_e^k - величина возможного экономического риска на k -ом направлении (длина пути), руб./год; M – количество рёбер на k -ом направлении; m – номер ребра на k -ом направлении; n – количество участков на ребре k -ого направления, соответствующих категории последствий при наступлении оползневого события; i – номер участка на ребре k -ого направления, соответствующего категории последствий при наступлении оползневого события; l_i^k - длина i -го участка на ребре k -ого направления, соответствующего одной из категорий последствий при наступлении оползневого события, м; R_e^m - величина возможного экономического риска на ребре k -ого направления (вес ребра), руб./год; R_{ei} - величина возможного экономического риска на участке ребра k -ого направления, руб./год; L_m^y - полная длина ребра, м (участка варианта направления трассы).

В том случае, если выполняется сравнение и отбор вариантов направления по критерию минимизации оползневой опасности и возможных экономических рисков, целевая функция, выражающая полный оползневой риск R , может быть представлена следующей зависимостью:

$$R = \sum R_j(R_o, R_e, t) \rightarrow \min, \quad (7)$$

с ограничениями (для 5-ти балльной шкалы оценки оползневой опасности со значениями от 0 до 4):

$$\left. \begin{array}{l} R_o \in [0;4] \\ R_e \in [R_e^{\min}; R_e^{\max}] \\ t \in [t^{\min}; \square] \end{array} \right\}, \quad (8)$$

где t – период наблюдений, лет.

Для поиска варианта направления, удовлетворяющего заданных выше условиям по одному критерию можно использовать алгоритмы поиска кратчайших путей и ближайших к ним, изложенные в [9].

Таким образом, оценка варианта направления трассы по предложенными критериям, учитывающая факторы оползнеобразования, возможное развитие оползневых процессов и потенциальные экономические потери, позволит отобрать наиболее рациональный вариант, а также в значительной степени повысить качество принимаемых решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянова Е. П. Основные закономерности оползневых процессов. Москва: Недра, 1972. –308 с.
2. Золотарёв Г. С. Инженерная геодинамика. Москва: МГУ, 1983. –328 с.
3. Изыскания и проектирование железных дорог [Текст]: Учебник для вузов ж. д. трансп. / И.В. Турбин, А.В. Гавриленков, И.И. Кантор [и др.]: под ред. И.В. Турбина. – М.: Транспорт, 1989. – 479 с.
4. Ларичев, О. И. Теория и методы принятия решений, а так же Хроника событий в Волшебных Странах : учебник / О. И. Ларичев. – М. : Логос, 2000. – 296 с.
5. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология. – Л.: Недра, 1978.
6. Маций С. И. Противооползневая защита и управление риском // дис... доктора технических наук: 05.23.11. Волгоград. 2010. С. –380.
7. Н. Кристофидес. Теория Графов. Алгоритмический подход – М.: Мир, 1978. – 432 с.
8. Ревзон А. Л. Космическая фотосъёмка в транспортном строительстве. М., Транспорт, 1993. –272 с.
9. Спасская К. А. Материалы Всероссийской молодёжной научно – практической конференции с международным участием «Научно – техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» // Обоснование выбора направления трассы новой железной дороги на основании многокритериальной оценки. Хабаровск. 2013. С. 35-40
10. Фоменко И. К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности // дис... доктора геол. минер. наук: 25.00.08. Москва. 2014. С. – 318.

Рецензент: В. А. Анисимов, доктор технических наук, профессор кафедры «Железнодорожный путь и проектирование железных дорог», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения».

Spasskaya Kseniya
Far Eastern State Transport University
Russia, Khabarovsk
E-Mail: university_work@mail.ru

Selection criteria for the direction of the railway, based on dynamics of landslide processes

Abstract. In the article discusses issues related to the choice of the principal directions of the route of the new railway between known reference points. Model of possible directions, represented as a combination of strong points and fixed points, described using the graph theory.

When designing the railways apply the principle of variance for the comparative evaluation in terms of efficiency of a design solution. Most often, the cost parameters play a key role in solving the problem of the choice options. Getting the optimal variant is unlikely on the basis of the sole criterion for comparison, so the selection of rational choices of many possible destinations is a multicriteria optimization problem.

Given the fact that the prospective territories for the construction of new railways are of the North, Far East and Eastern Siberia, characterized by low development and difficult conditions, including the emergence and development of exogenous processes, it becomes necessary selection criteria - specific areas. Insufficient knowledge of local conditions may eventually affect the quality of the design decisions, lead to increase in terms of the cost of construction and facilities, as well as the appearance of the barrier locations and emergencies during operation.

In the article is offered as additional selection criteria to use risk assessment landslide and the value of potential economic consequences upon the occurrence of landslide events.

Keywords: new railways; railway track direction; the criteria; graph theory; satellite imagery; forecast landslide hazard mapping; economic loss; slope stability.

Identification number of article 92TVN314

REFERENCES

1. Emel'janova E. P. Osnovnye zakonomernosti opolznevyh processov. Moskva: Nedra, 1972. 308 s.
2. Zolotarjov G. S. Inzhenernaja geodinamika. Moskva: MGU, 1983. 328 s.
3. Izyskanija i proektirovanie zheleznyh dorog [Tekst]: Uchebnik dlja vuzov zh. d. transp. / I.V. Turbin, A.V. Gavrilencov, I.I. Kantor [i dr.]: pod red. I.V. Turbina. – M.: Transport, 1989. – 479 s.
4. Larichev, O. I. Teorija i metody prinjatija reshenij, a tak zhe Hronika sobytij v Volshebnyh Stranah : uchebnik / O. I. Larichev. – M. : Logos, 2000. – 296 s.
5. Lomtadze V.D. Inzhenernaja geologija. Special'naja inzhenernaja geologija. – L.: Nedra, 1978.
6. Macij S. I. Protivoopolznevnaja zashhita i upravlenie riskom // dis... doktora tehniceskikh nauk: 05.23.11. Volgograd. 2010. S. 380.
7. N. Kristofides. Teorija Grafov. Algoritmicheskij podhod – M.: Mir, 1978. – 432 s.
8. Revzon A. L. Kosmicheskaja fotos#jomka v transportnom stroitel'stve. M., Transport, 1993, 272 s.
9. Spasskaja K. A. Materialy Vserossijskoj molodjozhnoj nauchno – prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Nauchno – tehniceskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke» // Obosnovanie vybora napravlenija trassy novoj zheleznoj dorogi na osnovanii mnogokriterial'noj ocenki. Habarovsk. 2013. S. 35-40
10. Fomenko I. K. Metodologija ocenki i prognoza opolznevoj opasnosti // dis... doktora geol. miner. nauk: 25.00.08. Moskva. 2014. S. 318.