

УДК 551.3

## ПРОЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА АВТОТРАССЕ «КОЛЫМА» (ЯКУТСК – МАГАДАН)

<sup>1</sup>Поморцева А.А., <sup>2</sup>Поморцев О.А., <sup>1</sup>Поспехов Г.Б., <sup>1</sup>Кондакова В.Н.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург,  
e-mail: a.a.pomortseva@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Якутск

Рассматриваются современные инженерно-геологические проблемы автотрассы «Колыма» – Якутск – Магадан проложенной в труднодоступной горной местности хребтов Верхоянья и системы Черского, в исключительно сложных природно-климатических условиях, в зоне сплошного распространения толщ многолетнемерзлых пород, мощность которых достигает 500 м и более и крайне расчлененного рельефа. Особое внимание уделено выявлению закономерностей возникновения и развития опасных инженерно-геологических процессов и явлений на автотрассе. Материалы, положенные в основу работы, были получены авторами в период с 2000 по 2019 г. в процессе климатологических, физико-географических, палеогеографических и инженерно-геологических исследований природных комплексов Якутии (Россия) выполнявшихся в рамках целевых федеральных (2013–2014) и региональных (2005–2017) грантов и личной инициативы авторов. В масштабах опытного участка трассы (600–725 км) определены природные и техногенные факторы, обуславливающие опасные инженерно-геологические проявления на трассе. Рассмотрена роль геолого-тектонических, геоморфологических, геокриологических, гидрогеологических и климатических условий. Установлено, что в своем заложении, особенно в процессе реконструкции в 2012–2017 гг., автотрасса «Колыма» нередко подрезает коллювиальные, пролювиально-делювиальные шлейфы гор и конусы выноса временных водотоков, создавая условия для поступления склоновых отложений непосредственно в зону полотна трассы. Развитию этого процесса наряду с широким распространением гляциальных, флювиогляциальных, делювиальных и др. наносов и значительных уклонов бортов долин нависающих над трассой, способствуют аномалии климата, модулирующие активизацию опасных экзогенных геологических проявлений. В условиях горной местности аномалии ливневых осадков модулируют паводковые волны катастрофических масштабов способные сносить не только подтаявшие отложения склонов, но и разрушать тело дорожной подушки, особенно на участках ливневых переходов. Оценена существующая инженерная защита трассы. Сделан прогноз развития инженерно-геологических процессов и явлений на перспективу и рекомендации по оптимизации инженерных решений в области обеспечения безопасной эксплуатации автотрассы.

**Ключевые слова:** автотрасса «Колыма», геологическая среда, инженерно-геологические обстановки, аномалии климата, экзогенные геологические процессы, инженерные решения

## MANIFESTATION OF DANGEROUS GEOLOGICAL PROCESSES ON THE KOLYMA HIGHWAY (YAKUTSK – MAGADAN)

<sup>1</sup>Pomortseva A.A., <sup>2</sup>Pomortsev O.A., <sup>1</sup>Pospekhov G.B., <sup>1</sup>Kondakova V.N.

<sup>1</sup>Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, e-mail: a.a.pomortseva@mail.ru;

<sup>2</sup>North-Eastern Federal University after M.K. Ammosov, Yakutsk

The modern engineering and geological problems of the Kolyma – Yakutsk – Magadan highway laid in the inaccessible mountainous terrain of the Verkhoyanya ridges and Chersky system are considered, in extremely difficult natural and climatic conditions, in a zone of continuous distribution of permafrost which thickness reaches 500 m or more in conditions of extremely dissected relief. Particular attention is paid to identifying patterns of occurrence and development of hazardous engineering and geological processes and phenomena on the highway. The materials of the work were obtained by the authors in the period from 2000 to 2019 during the climatological, physical-geographical, paleogeographic and engineering-geological studies of natural complexes of Yakutia (Russia) carried out as part of targeted federal (2013-2014) and regional (2005-2017) grants and a personal initiative of the authors. On the scale of the experimental section of the route (600-725 km), natural and technogenic factors that cause the dangerous engineering and geological manifestations on the route have been determined. The role of geological-tectonic, geomorphological, geocryological, hydrogeological and climatic conditions is considered. It has been established that in its foundation, especially during the reconstruction in 2012-2017, the Kolyma highway often cuts off the colluvial, proluvial-deluvial mountain trails and the cones of the removal of temporary watercourses, creating conditions for the entry of slope deposits directly into the area of the track. The development of this process, along with the wide distribution of glacial, fluvioglacial, deluvial and other sediments and significant slopes of the sides of the valleys overhanging the route, is facilitated by climate anomalies modulating the activation of dangerous exogenous geological manifestations. In mountainous areas, anomalies of rainfall modulate catastrophic flood waves capable of carrying not only melted deposits of slopes, but also destroying the body of the road cushion, especially in areas of storm transitions. The existing engineering protection of the route is evaluated. A forecast for the development of geotechnical processes and phenomena in the future and recommendations for optimizing engineering solutions in the field of ensuring safe operation of the highway are made.

**Keywords:** Kolyma highway, geological environment, engineering and geological conditions, climate anomalies, exogenous geological processes, engineering solutions

Автотрасса «Колыма» – Якутск – Магадан является важнейшей транспортной артерией Сибири, обеспечивающей жиз-

недеятельность обширной территории Евразии расположенной к востоку от бассейна реки Лены. Учитывая наличие богатых



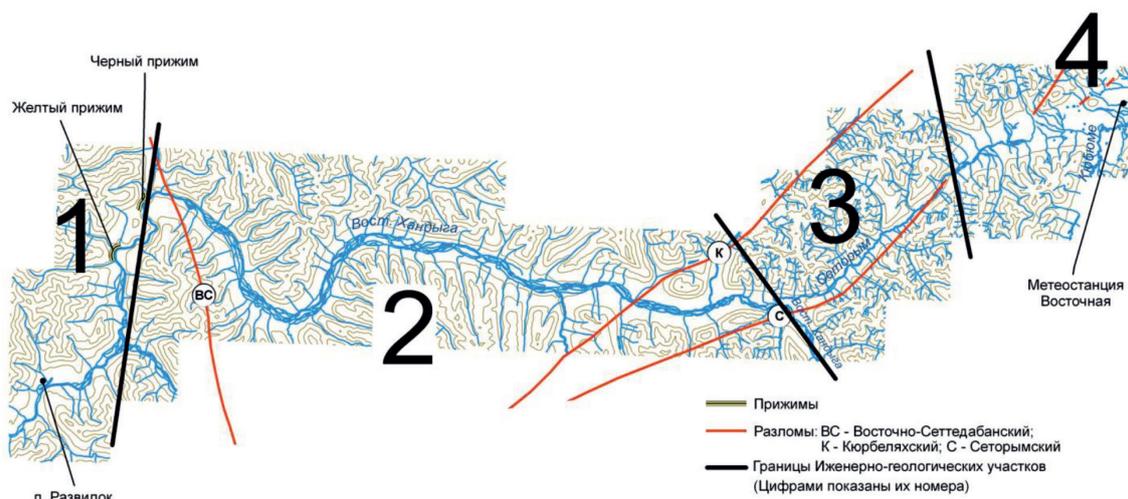


Рис. 2. Схема эталонных инженерно-геологических участков

В пределах опытного участка было выделено четыре самостоятельных эталонных участка, различающихся особенностями рельефа и экзогенно-геологическими проявлениями (рис. 2).

*Первый участок* приурочен к восточному крылу хр. Сетте-Дабан. Протяженность участка 31 км – от пос. Развилок (600-й км трассы) – до впадения р. Некунья – правого притока р. Восточная Хандыга (631 км). Участок характеризуется глубоко расчлененным рельефом и опасными скальными стенками. Отдельные горные вершины здесь превышают днище долины на 800–1100 м. Гребни водоразделов извилисты и круты с абсолютными отметками – до 1800–1900 м и более [3].

На привершинных частях склонов распространены стенки (зеркала) скальных срывов с осыпными лотками, простирающимися в нижние части бортов долины. Они чередуются с участками отвесных скальных обрывов, приуроченных непосредственно к полотну автотрассы. Это так называемые Желтый и Черный прижимы, осложняющие движение по участку и в целом по трассе.

На шлейфах отложений обвалов и осыпей широкое распространение получили курумы, солифлюкция и мерзлотная сортировка каменного материала. Делювиальные шлейфы из мелкообломочного материала несут следы эрозионного расчленения.

Особая опасность на участке таится в обрывистых и нависающих склонах долины, обладающих значительной потенциальной энергией для развития гравитационных процессов – обвалов и осыпей.

*Второй участок* простирается от устья р. Некунья (632-й км трассы) до устья следующего крупного правого притока р. Сеторыма (662-й км). Его протяженность 30 км. Участок ограничен с запада и востока разрывными нарушениями Восточно-Сетте-Добанского и Сеторымского разломов. Здесь трасса проходит по пологой площадке плейстоценовой террасы высотой 10–20 м и шириной до 600 м, сложенной флювиогляциальными наносами. Площадка имеет незначительный уклон в направлении русла реки. Борт долины здесь приобретает сглаженные очертания. Преобладают длинные и разложитые склоны с руслами временных и постоянных водотоков имеющие значительные площади водосборов. На отдельных участках наблюдаются скальные выходы коренных пород в виде останцов которые поставляют каменный материал в потоки гравитационных отложения в виде обвальной и осыпной аккумуляции. Склоны большей частью террасированы с уклонами до 30°, изрезаны многочисленными промоинами водотоков. Выше тылового шва, в области распространения аргиллитов при крутизне склонов 45° распространены шлейфы осыпных отложений, нависающих над дном долины. Вершины водоразделов достигают 1800–2100 м, а их превышениями над дном долины до 1300 м.

*Третий участок* трассы имеет северовосточное простирание и проходит непосредственно по зоне Сеторымского разлома (рис. 2). Его протяженность 18 км.

Первые пять километров (от 663 по 668 км трассы) проложены по площадке водноледниковой террасы высотой в 10–15 м и шириной 350–400 м. Местами на поверхность террасы выходят коренные породы. При приближении к главному водоразделу долина приобретает скалистые очертания с крутыми стенками и блоками останцов, разбросанных по линии разлома. Ширина долины не превышает 500–600 м, в каньонообразном русле наблюдается обилие перекастов и аллювиальных пойменных террас. Гребни водоразделов воздымаются до отметок 2200–2300 м. Характерны тектонические уступы высотой в 15–25 м и каньонообразность русел притоков. При этом русла ручьев глубоко прорезают отложения аллювиальных конусов выноса. На участках аккумуляции обвальных, осыпных и делювиальных отложений имеет место развитие процессов курумообразования, мерзлотной сортировки отложений и солифлюкции.

*Четвертый участок* приурочен к Алдано-Индибирскому водоразделу с абс. отметками 1300–1350 м. Его протяженность 33 км (682–725 км трассы). Это верховья долин р. Сеторыма и р. Кобюме. В рельефе доминирует массивное среднегорье с выположенными формами древнего денудационного рельефа. Дно горных долин при ширине 3,5–4,5 км приобретает классический облик древних трогов и ледоемов. Преобладают увалистые и сглаженные формы рельефа. Моренные валы и зандры здесь чередуются с внутриморенными котловинами, маркированными цепочками озер и болот. Водоразделы с отметками в 2000–2500 м сглажены и уплощены. Гребни моренных валов превышают на 10–15 м днища долин водотоков. На участках развития техногенеза вдоль полотна трассы происходит таяние погребенных льдов, наледообразование и термокарстовые и суффозионные просадки. Мощность рыхлых отложений судя по горным выработкам не превышает 20 м.

*Многолетнемерзлые породы* характеризуются сплошным распространением по площади и разрезу. Талики преимущественно несквозные, распространены локально под руслами рек и под крупными озерами. В межгорных впадинах пойменный аллювий с синкриогенными жилами льда характеризуется объемной льдистостью 0,5–0,6, делювиально-солифлюкционные отложения пологих склонов и элювиально-делювиальных водораздельных поверхностей – 0,2–0,3.

На участках, лежащих не выше отметок порядка 1300 м, наблюдается своего рода

гомотермия, когда одна и та же температура горных пород может наблюдаться как вблизи уровня моря, так и на водоразделах горных гряд с отметкой в 1300 м.

Для этого же диапазона высот характерно наличие определенных пределов изменения температуры горных пород. Последние, как правило, не опускаются ниже  $-8^{\circ}$  и не поднимаются выше  $-4^{\circ}$ , то есть на любой высоте можно столкнуться с изменениями температуры горных пород в этом диапазоне [4].

Устойчивое понижение температуры горных пород с высотой отмечается только на участках, лежащих выше отметок 1200–1300 м, причем здесь температура горных пород отчетливо зависит также и от экспозиции склонов. На склонах северной ориентации температура горных пород ниже, чем на склонах южной на  $2-3^{\circ}$ .

Сопоставлениями результатов наблюдений за температурой воздуха с аналогичными данными по температуре грунтов было установлено, что даже на восточном склоне глубочайшая инверсия температуры воздуха в приземном слое не сказывается на тенденции изменения температуры горных пород, которая непрерывно понижается. Как показали исследования на геокриологической станции Сунтар-Хаята, понижение температуры горных пород с увеличением отметок местности обусловлено в первую очередь незначительной величиной радиационного баланса в высокогорной области ( $7,2$  ккал/см<sup>2</sup>год) по сравнению с низменностями ( $29,7$  ккал/см<sup>2</sup>год) за счет сильного излучения зимой, связанного с господством антициклональных режимов погоды и относительно небольшим поглощением тепла летом из-за сильного отражения и рассеяния радиации снегом, который к тому же лежит здесь большую часть года. Все это усугубляется интенсивным влагооборотом в почве летом в высокогорной области, где, несмотря на низкую температуру воздуха, благодаря обилию осадков (500–700 мм по сравнению с 150–200 мм в предгорьях) и сильным ветрам, испаряется влага в 2–3 раза больше, чем на низменностях у подошвы хребтов [5].

Наши наблюдения, выполненные, 14 июля 2013 г. в районе ГМС Восточная показали, что в горной выработке изолированной от воздействия внешних температур приземного воздуха специально построенным срубом из бревен мерзлые горные породы на глубине 1,75 м имели температуру –  $14^{\circ}\text{C}$ .



Рис. 3. Подтопление и разрушение полотна трассы «Колыма» во время июльского паводка 2013 г. (Эталонный участок 2)

Климат района формируется под влиянием Сибирского антициклона и отличается устойчивостью зимних холодов и относительно прохладным летом. Средняя температура воздуха в январе –  $-35\div-48^{\circ}\text{C}$ , – в июле –  $11\div 18^{\circ}\text{C}$ . Абсолютный максимум температуры воздуха  $29\text{--}38^{\circ}\text{C}$ , абсолютный минимум –  $-54\div-68^{\circ}\text{C}$ . Положительные температуры не превышают период в 140–160 дней. За период с 1966 по 2018 г., среднегодовая температура воздуха здесь составляет  $-12,1^{\circ}\text{C}$  при количестве жидких атмосферных осадков 350–400 мм, и величине снежного покрова 30–60 см.

Анализ многолетней изменчивости ходов температуры приземного воздуха и атмосферных осадков показал, что в районе опытного участка трассы, как и в целом на планете, отмечаются значительные аномалии в ходах метеоэлементов и направленный рост среднегодовой температуры. Согласно значениям линейных трендов рядов температуры в масштабах региона за последние десятилетия они составили: в Оймяконе  $-0,49^{\circ}\text{C}/10$  лет, в Томпо –  $0,38^{\circ}\text{C}/10$  лет, в Крест-Хальджае –  $0,51^{\circ}\text{C}/10$  лет, что более чем вдвое выше, чем на планете в целом. Так же, как и в случае со среднегодовой температурой воздуха, на всех метеостанциях отмечаются статистически значимые тренды повышения температуры воздуха за теплый период. Эти тренды составили: в Оймяконе –  $0,37^{\circ}\text{C}/10$  лет, в Томпо –  $0,28^{\circ}\text{C}/10$  лет, в Крест-Хальджае –  $0,35^{\circ}\text{C}/10$  лет. За холодный период года они составили: в Оймяконе –  $0,54^{\circ}\text{C}/10$  лет, в Томпо –  $0,39^{\circ}\text{C}/10$  лет, в Крест-Хальджае –  $0,58^{\circ}\text{C}/10$  лет, что свидетельствует о том, что зимнее потепление на указанных станциях на сегодня выше, чем летнее.

В режиме атмосферных осадков, как показали наши исследования, наблюдается

большая межгодовая и внутригодовая изменчивость. В среднем на теплый период года (май – сентябрь) приходится до 70% от годовой суммы осадков.

На фоне многолетней изменчивости осадков своей неординарностью выделяется июль 2013 г. Наиболее ярко это проявилось в Оймяконе и в Крест-Хальджае, где были установлены новые абсолютные рекорды июля. В Томпо сумма осадков оказалась близкой к рекордной [6].

Аномальные погодные условия июля 2013 г., в первую очередь по суммам выпавших атмосферных осадков, на территории Томпонского и Оймяконского районов многократно превысивших их месячную норму, создали критические условия для активизации негативных гидрологических (паводки) и мерзлотных процессов (термоэрозия, термосуффозия, солифлюкция, оползни). Последнее нашло отражение в инженерно-геологических обстановках сложившихся в это время на трассе.

Особенно ярко инженерно-геологические процессы проявились на втором эталонном участке, где водосборы длинных и разложистых склонов водоразделов аккумуляровали значительное количество атмосферных осадков зарождая мощные линейные потоки, сила которых, как показали наши исследования, способна разрушать не только инженерную защиту трассы, но и саму трассу (рис. 3).

### Заключение

Глубоко расчлененный рельеф изученной территории в сочетании с достаточно сложным тектоническим строением предопределяет активные проявления сейсмических и экзогенных геологических процессов гравитационного, флювиального и криогенного генезиса. Эти процессы на всем протяжении опытного участка

трассы способны в той или иной степени осложнять инженерно-геологическую обстановку, а с учетом происходящих изменений климата приводить к возникновению не только сложных, но и опасных в инженерно-геологическом и геоэкологическом отношении ситуаций [7]. Наибольшую опасность на сегодня представляют аномалии летних атмосферных осадков, способных создавать разрушительные паводковые волны. Выявленные положительные тренды температуры приземного воздуха пока еще компенсируются чрезвычайно низкими температурами горных пород и не могут оказывать существенного воздействия на динамику инженерно-геологических обстановок на трассе.

#### Список литературы / References

1. Поморцев О.А., Попов В.Ф., Рожин С.С. Землетрясения: ритмические основы долгосрочного прогноза (на примере Якутии) // Отечественная геология. 2011. № 6. С. 33–38.
2. Бондарик Г.К., Ярт Л.А. Инженерно-геологические изыскания. М., 2007. 418 с.
3. Оксман В.С., Третьяков М.Ф. Сунтарская система разломов: кинематическая и геодинамическая интерпретации // Отечественная геология. 2001. № 5. С. 52–55.
4. Oksman V.S., Tretyakov M.F. The Suntar fault system: kinematic and geodynamic interpretations // *Otechestvennaya geologiya*. 2001. № 5. P. 52–55 (in Russian).
5. Shumway R.H., Stoffer D.S. *Time Series Analysis and Its Application*. Dortmund: Springer, 2017. 562 p.
6. Becher M., Olid C., Klaminder J. Buried soil organic inclusions in non-sorted circles fields in northern Sweden: Age and palaeoclimatic context. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2013. 111 p. DOI: 10.1002/jgrg.20016.
7. Bass R. *Stochastic processes*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011. 390 p.