

УДК 553.041; 553.69

Н.В. Вилор<sup>1</sup>, М.Ю. Толстой<sup>1</sup>, М.А. Вилор<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Иркутск<sup>2</sup>Институт географии СО РАН, Иркутск

e-mail: vilor@igc.irk.ru

## Применение методов дистанционного зондирования Земли для поисков и оценки геотермальных ресурсов на юге Восточной Сибири (Россия)

Перспективой долгосрочного плана организации теплоснабжения населенных пунктов и предприятий на особо охраняемой южной части Байкальского региона является замена углеводородного топлива на экологически чистую безвозмездно получаемую низко потенциальную первичную тепловую энергию, неисчерпаемыми запасами которых располагает Байкальская рифтовая зона (БРЗ). Целью статьи является изучение и оценка ее геотермальных ресурсов с привлечением методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), таких как тепловая космическая съемка, ТКС в комплексе с геолого-геохимическими и геофизическими электромагнитными исследованиям. По данным ТКС с искусственных спутников (ИС) Земли установлено пространственное совмещение и генетическая связь уходящего поверхностного ИК излучения с сейсмоактивными и термоактивными разломами БРЗ различной кинематики. В данном исследовании территории южного Прибайкалья при ТКС использованы дистанционные измерения яркостной температуры от радиометров MODIS на ИС системы EOS. Наземные исследования объединяли измерения термодинамической поверхностной и грунтовой температуры, геохимическое опробование почв, грунтов, горных пород на разломах и геофизические электромагнитные исследования методом ЗСБ-МПП. Поиски и оценка геотермальных ресурсов локализованы на Тункино-Байкальской аномалии уходящего поверхностного ИК излучения, экспонирующей выходы региональных сейсмо-, термоактивных Южно-Тункинского, Главного Саянского и Южно-Байкальского разлома (ЮБР). На ЮБР яркостные температуры аномальных максимумов отличаются от фона в октябре-декабре на 6-15 К. Их положение на измерительных профилях постоянно. Квазистационарный поток центральной части термозоны ЮБР, равный  $0.0145 \pm 0.00027$  Вт с удельной мощностью  $14.435$  КВт/км<sup>2</sup>, соответствует тепловому потенциалу разлома. В результате комплексных исследований установлено расположение подземного геотермального резервуара в приразломной тектонической зоне с глубиной залегания 350-400 м и тепловой мощностью 7.039 МВт. Выявленные геотермальные ресурсы актуальны, так как их эксплуатация обеспечит расширение инфраструктуры местного бальнео-курортного центра и создание рабочих мест для населения г. Байкальск в связи с проблемами трудоустройства из-за ликвидации Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.

**Ключевые слова:** Байкальская рифтовая зона, поверхностное инфракрасное излучение разломов, тепловой поток, мощность, температура, термальные воды, геотермальные ресурсы.

### Введение

В южной индустриальной части иркутского Приангарья и Прибайкалья, включаемых в зону атмосферного влияния Байкальской природной территории (БПТ), имеющей статус объекта Всемирного Наследия ЮНЕСКО, отчетливо сформирована необходимость привлечения экологически чистых, минимально затратных, неисчерпаемых источников первичной тепловой энергии. Таковыми являются геотермальные ресурсы (ГР) Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Употребление ГР в хозяйственной деятельности региона понижает загрязняющее влияние Иркутско-Черемховской индустриальной зоны южного Приангарья на особо охраняемую Центральную экологическую зону Байкальской территории (ЦЭЗ БПТ). Населенные пункты с их промышленными объектами и жилыми массивами энергодефицитны из-за необходимости постоянного тепло- и горячего водоснабжения при том, что традиционные способы теплогенерации создают существенные экологические ограничения и экономические издержки из-за особого статуса ЦЭЗ БПТ. Одним из направлений в долгосрочном плане энергообеспечения является замена углеводородного топлива для теплоснабжения населенных пунктов и предприятий на экологически чистую безвозмездно получаемую низко потенциальную первичную тепловую энергию, неисчерпаемыми запасами которых располагает БРЗ. Проведенные технико-эко-

номические расчеты обосновывают экономическую целесообразность такой замены соответственно концепции энергоэффективности и энергосбережения (Мороз и др., 2011, Толстой и др., 2012).

Байкальский регион располагает месторождениями природных горячих минеральных вод (Кустов и др., 2000, Ломоносов и др., 1974, 1977, Лысак, 1968) с неисчерпаемым потенциалом первичной тепловой энергии в их геотермальных ресурсах. В связи с необходимостью применения альтернативных источников энергии конкретными потребителями проводятся поиски ГР в южном Прибайкалье Иркутской области на перспективных площадях с подземными геотермальными резервуарами. Целью статьи является изучение и оценка ГР с привлечением методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), таких как тепловая космическая съемка (ТКС) (Горный и др., 1993) в комплексе с геолого-геохимическими и геофизическими электромагнитными исследованиями.

### Геотермальная энергия БРЗ

Современной геодинамикой БРЗ наряду с увеличенными значениями гравитационных, геоэлектрических и сейсмологических характеристик создается высокий тепловой поток, формирующий ГР. На фоне окружающей внутриконтинентальной рамы БРЗ выделяется региональной термоаномалией (Рис. 1), энергетически обеспечива-

ющей как поверхностные, так и верхнекоровые эндогенные процессы, такие как высокие приразломные теплотокеты, геотермальные поля, ГП и поверхностные гидротермы. Проявления теплогенерации в технически доступной части верхней коры рассматриваются как геотермальные ресурсы, являющиеся важнейшим полезным ископаемым с рассчитываемыми и прогнозируемыми запасами, пригодными для рентабельного использования. ГР соответствуют количеству тепла, содержащемуся на определенном интервале глубины в верхней части земной коры с внешним температурным пределом, определяемым среднегодовой температурой поверхности данной территории. Глубина нижнего предела, ограниченная технологическими возможностями, не превосходит 3-5 км.

Аномальные глубинные температуры в структуре БРЗ между массивами Сибирской и Амурской платформ (Рис. 1) (Дучков, Соколова, 2000) обусловлены повышенным тепловым потоком, который вблизи поверхности трансформируется в формы, доступные для оценки и использования в жизнеобеспечении техносферы и влияющие на качество актуального полезного ископаемого – первичной тепловой энергии. Главными структурными элементами, влияющими на распределение теплового потока, являются региональные разломы, в том числе сейсмоактивные, термоактивные (Лысак, 2002). Выделяются 44 термоактивных разлома. На 28 разломах фиксируется

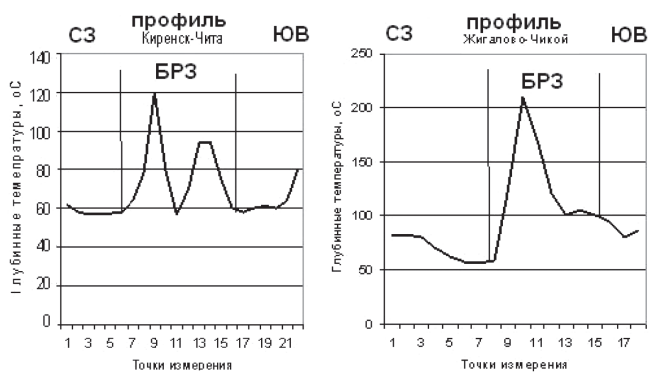


Рис. 1. Аномальные глубинные температуры на региональных сечениях БРЗ.

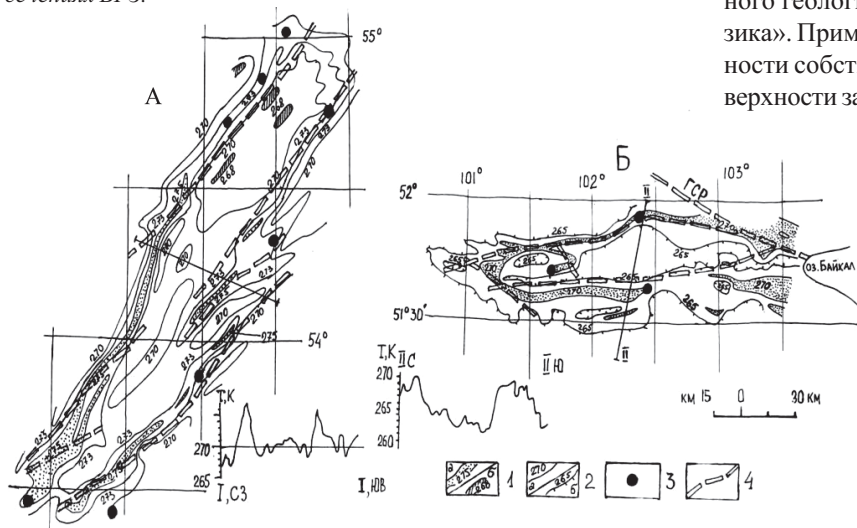


Рис. 2. Соотношение экстремумов радиационной (яркостной) температуры ( $K$ ) уходящего поверхностного инфракрасного излучения и выходов ограничивающих разломов в Баргузинской (А) и Тункинской (Б) рифтогенных впадинах БРЗ. 1 – экстремумы: 1а – максимумы, 1б – минимумы, 2 – изотермы: 2а – максимумов, 2б – минимумов, 3 – месторождения горячих минеральных вод, 4 – разломы.

повышение поверхностного теплового потока (ПТП). Региональный тепловой поток БРЗ превышает  $60 \text{ мВт/м}^2$ . В южном Приангарье он составляет 40 и более  $\text{мВт/м}^2$ .

По данным ДЗЗ методом тепловой ИК съемки с искусственных спутников (ИС Земли) установлено пространственное совмещение и генетическая связь уходящего поверхностного ИК излучения с сейсмоактивными и термоактивными разломами различной кинематики (Вилор, Минько, 2001, Вилор и др., 2008). Максимальные значения яркостной, радиационной температуры  $T$ , вычисляемой из измеренного яркостного потока  $L$  по стандартным программам ENVI 4 и 4.4, пространственно связаны с картируемыми сместителями разломов, контролирующими размещение месторождений термальных вод (Рис. 2). Выходы термоактивных разломов трассируются непрерывными максимумами величин уходящего ИК потока, измеряемого спутниками серий NOAA (спутники 16, 18, сенсор AVHRR), значения которого достигают (по данным сводной ИК карты)  $55 \text{ мВт/м}^2$ -ср-мкм в диапазоне 10 мкм, и наибольшим уровнем яркости отраженного радиолокационного сигнала (по измерениям ИС ENVISAT, 2004-2005 г. и ALOS PALSAR, 2010 г.). Аналогичные данные получены от системы ИС TERRA-EOS с сенсором MODIS в TIR диапазоне. Из методов ДЗЗ для изучения природных региональных приразломных поверхностных ИК аномалий на территории южного Прибайкалья привлечена ТКС с целью поисков подземных геотермальных резервуаров и оценки их геотермальных ресурсов.

## Методика

При дистанционных измерениях уходящего поверхностного теплового потока использованы данные радиометров MODIS с ИС системы EOS соответственно методике ТКС (Горный и др., 1993). Сцены для определения радиационной температуры  $T$  получены из базы данных станции приема спутниковой информации Восточно-Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья (ВСНИИГГиМС) Федерального государственного унитарного научно-производственного геологического предприятия «Иркутскнефтегеофизика». Применялись спутниковые изображения интенсивности собственного уходящего ИК излучения земной поверхности за период с октября по декабрь 2012-2013 годов,

полученные в безоблачные ночные, предутренние часы позднего осеннего и зимнего сезонов в спектральной области 8.4 мкм по профилям, ориентированным вкострости простирающихся главных элементов геологической структуры на перспективной площади Муринско-Выдринской депрессии южного побережья оз. Байкал (Рис. 1 А). На сценах-изображениях ИК интенсивностей по программе ENVI 4.4 определен яркостный поток  $L$  уходящего ИК излучения в точках с шагом 0.5 минуты. Результаты представлены значениями радиационной, яркостной температуры,  $T$ ,  $K$ , вычисленными из зависимости  $T$  от яркости  $L$  по формуле Планка (Госсорг, 1988) и расчетом поверхностного теплового потока  $F$  (ПТП). Дистанционные определения яркостной температуры допол-

нены наземными измерениями термодинамической поверхностной и грунтовой температуры на глубине 0.8-1 м в бурках по профилям электротермометрами с точностью до 0.2°C. Комплекс геохимических исследований включал геохимическое опробование почв, грунтов и горных пород на поверхности разломов в границах аномалий ИК излучения и гидрохимическое опробование поверхностных и грунтовых вод, дренирующих зоны разломов. Химический и спектральный анализ полученных образцов проведен в аттестованных лабораториях Института геохимии СО РАН, Иркутск.

Геофизические электромагнитные исследования методом ЗСБ-МПП (зондирование становлением поля ближней зоны в варианте метода переходных процессов) привлечены для изучения геолого-литологического строения разреза осадочных толщ с целью определения условий залегания термальных вод (Бадминов и др., 2012). Измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) проведены по профилям с геоэлектрическими разрезами глубиной до 450 м.

### Результаты

*Изучение интенсивности уходящего поверхностного ИК излучения сейсмо- и термоактивных разломов методом ТКС*

Региональные измерения интенсивности приразломных потоков уходящего ИК излучения получены на основе сводной тепловой карты, созданной по данным ТКС, на территорию юга Восточной Сибири от 97° до 107° восточной долготы и от 50° до 57° северной широты, включающей БРЗ. Картографическое изображение собрано из усреднения архивной информации за 2000-2006 годы в съемках системы ИС NOAA. Эмиссионный поток ИК излучения значительно дифференцирован. Его основные морфологические разновидности, экспонирующие геологическую структуру, приведенные в таблице 1, характеризуют южное горное обрамление Сибирской платформы и БРЗ (Вилор, Минько, 2001, Вилор и др., 2008).

Аномалиями поверхностного ИК излучения выделяются региональные сейсмоактивные, термоактивные разломы, контурные разломы рифтогенных впадин, тектонически напряженные блоки на границе платформы и склад-

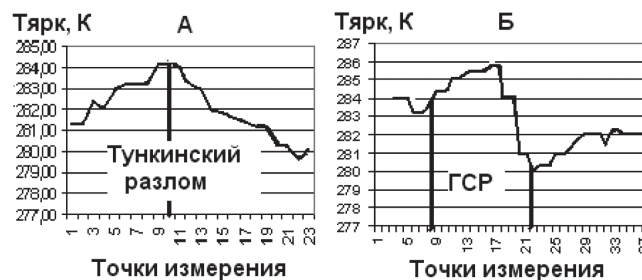


Рис. 3. Аномалии яркостной температуры поверхностного уходящего ИК излучения на сейсмоактивных разломах БРЗ. А. Тункинский разлом. Б. Главный Саянский разлом (ГСР).

чатого обрамления. Ареальная разновидность ИК эмиссии связана с изменчивостью гидрогеологической обстановки, геотермальными проявлениями и некоторыми литологическими комплексами.

Поверхностному ИК излучению БРЗ свойственно нормальное распределение величин яркостных потоков и яркостных температур на разломах и их поперечных сечениях при корреляции с тепловыми потоками водных масс, с рельефом разломных зон и выходами радоновых эманаций. В Саяно-Байкало-Патомском регионе измеренные величины ИК-потоков соответствуют четырем основным интервалам значений распределения величин потока и яркостных температур: 1. 50-60, 2. 60-70, 3. 70-80, 4. 80-90 мВт/м<sup>2</sup>-ср-мкм, ср – стерадиан, мкм – длина волны.

Графики значений интенсивности ИК излучения характеризуются положительными экстремумами с отчетливыми краевой, диффузной и осевой, центральная частями термомаксимумов. Отношение ширины диффузной и осевой части уменьшается в ряду основных морфологических разновидностей:

	линейная	контурная	полосовидная
	2-3.75	1.3-4.5	0.43-1
среднее	3	2.8	0.75

Ширина диффузной части асимметрична у линейных и полосовидных яркостных аномалий. Так на яркостной полосе Тункинского разлома (Аршанская аномалия) южная половина диффузной части более широкая с яркостной температурой 279-282 К (Рис. 3 А). Быстринская аномалия, связанная с Главным Саянским разломом (Рис. 3 Б), харак-

Форма	Длина L, км	Ширина N, км	L/N	Связь с рельефом	Связь со структурой	Регион	Устойчивость	
							во времени	в пространстве
Линейные	210-380	8-14.3	0.04	Низкогорное подножие основных хребтов СБГО	Рифтогенные разломы и краевой шов платформы	СБГО	Постоянные	Непрерывные
Контурные	120-210	6.2-1.39	0.05-0.06	Границы днища и склона рифтогенных впадин	Граничные сейсмогенные разломы	БРЗ	Постоянные	Непрерывные
Полосовидные	39-58	11-20	0.2-0.5	Среднегорные массивы, крутые склоны	Структура краевого шва платформы, Байкал	СБГО	Периодические	Неоднородные, прерывистые
Изолированные	1-1.6	1-1.3	1-1.23	Отдельные низкогорные массы	Краевые и платформенные структуры	Сибирская платформа	Постоянные	Отдельнорасположенные, иногда на краях периодических

Табл. 1. Морфологические особенности объектов СБГО и БРЗ с высокой ИК-излучения. Примечание: СБГО – Саяно-Байкало-Патомская горная область, БРЗ – Байкальская рифтовая зона.

теризуется более широкой северной диффузной частью.

На горячеводных месторождениях вдоль термоактивных разломов БРЗ и региональных аномалий поверхностного уходящего ИК излучения протяженностью в сотни километров термальные группы представлены несколькими (до десятка) выходами-дериватами. Поверхностные источники термальных вод и вскрытые бурением области их глубинного питания объединяются в геотермальные поля (ГП) (Вилор и др., 2015). Распределенные по площади источники (Уш-Белдир, Шумацкие) являются поверхностным выражением скрытых геотермальных полей. На сейсмоактивном Тункинском разломе ГП, разведанное бурением, занимает более 2 кв. км при глубине залегания около 420-450 м. На северо-западном борту Баргузинской впадины месторождения термальных вод располагаются вдоль контролирующих сбросов дискретно с некоторым регулярным «шагом» 15-30 км. Известные ГП, связанные с пересечениями основных контролирующих разломов и поперечных нарушений, чаще всего сбросов, тяготеют к трассам главных сместителей или объединяются по удалению от них в 3 статистические группы: не далее 0.2-0.5 км (для большинства) и 0.6-1.5 км, реже они размещаются на расстоянии до 6 км по данным (Ломоносов, 1974, Лысак, 1988). На структурных пересечениях термальные воды заполняют объемные коллекторы – геотермальные резервуары, проявляясь на поверхности как термальные источники, экспонированные локальными тепловыми аномалиями. Находясь в контурах региональных аномалий уходящего ИК излучения сейсмоактивных разломов, ГП участвуют в формировании ПТП. Поверхностный тепловой поток на геотермальном поле Кучегер (Вилор и др., 2015) на площади 0.2 км<sup>2</sup> достигает 74 Вт/м<sup>2</sup> при средневзвешенном значении поверхностной температуры воды 20-23 °С. Тепловой поток Окинской гидротермальной системы в среднем равен 76.3 Вт/м<sup>2</sup> при максимальных температурах источников на поверхности 38.5 °С (Бадминов и др., 2013). Тепловые потоки геотермальных месторождений сравнимы с тепловым потоком в дно южной котловины оз. Байкал (Голубев, 2007).

*Изучение зоны повышенной интенсивности уходящего поверхностного ИК излучения на сейсмо-термоактивном разломе для поисков и оценки ГР*

Протяженная региональная Тункино-Байкальская аномалия ИК излучения, экспонирующая выходы региональных Южно-Тункинского, Главного Саянского и Южно-Байкальского разломов (Вилор, Минько, 2001) включает район поисков ГР с привлечением комплекса ДЗЗ и наземных методов в южном Прибайкалье. Подводный разлом-сброс Черского с аномально повышенным донным тепловым потоком (Голубев, 2007) создает северную границу Мурынско-Выдринской депрессии – краевой наземной периферии южной впадины оз. Байкал, площади, перспективной для поисков. На южном контуре депрессии в предгорной части передового хребта Хамар-Дабан региональная аномалия уходящего поверхностного ИК излучения совмещена с выходом сместителя Южно-Байкальского разлома, сброса (Рис. 4 А). В зоне аномальной интенсивности уходящего поверхностного ИК излучения расположены проявления сейсмической активности ЮБР – новейшие сейсмодислокации (Хромовских, 1965)

(Рис. 4 А). Яркостные температуры поверхности по данным ИС EOS измерены на участке выхода ущелья р. Снежная и передовом склоне Хамар-Дабана (Рис. 4 Б-Г). Точки измерения расположены на 7 профилях в количестве от 17 до 24 через 30'' по 140 измерений на каждой сцене.

На картах изотерм выделены положительные экстремумы и термальный минимум. Яркостные температуры максимумов отличаются от фона в октябре-декабре на 6-15 К. Положение экстремумов на профилях через центральную термозону стационарно. Размер длинной оси термального минимума и отдельного положительного термомаксимума увеличивается в зимнее время:

месяц	длина термоминимума, км	длина малого термомаксимума, км
октябрь	3	6
ноябрь	5	7.7
декабрь	8.7	9

Центральная термозона, располагаясь в основании хребта Хамар-Дабан и на его передовом склоне, экспонирует выход сместителя ЮБР на поверхность, протяженный региональный ИК термомаксимум которого совмещается с фронтальной границей области высокой сейсмической активности (Хромовских, 1965). Отдельная аномальная термозона, расположенная в грабене с мелкими озерами моренно-термокарстового происхождения, вероятно, имеет связь с подтоком подземных вод. Термоминимум проецирует массив островной многолетней мерзлоты.

При определении местных повышений температуры грунта из общей выборки 56 измерений (июль-август 2013-2014 г.) со средней величиной 10.88±2.29 °С для глубинного интервала от 1 до 1.4 м на графике зависимости «температура, t, °С – глубина h, м» обособляется группа точек с трендом:  $t = 13,567 h^{-0,1638}$  (6).

Она имеет среднее значение 13.5±1.09 °С и статистически обосновано выделяет локальное увеличение грунтовой температуры в 2 точках на границе центральной термозоны и в 17 точках малого термомаксимума между р. Снежная и р. Осиновка (Рис. 4). На участке повышения грунтовых температур, совмещенном с пересечением ЮБР и Снежинского сброса, проведены поиски с применением электромагнитного метода.

При съемке методом ЗСБ-МПП для определения положения подземного геотермального водного резервуара изучена геоэлектрическая структура распределения УЭС на глубину до 450 м. В вертикальных разрезах изоом выделяются горизонтальные границы на верхней и нижней частях поверхностных отложений. Верхний низкоомный уровень соответствует горизонту водообмена между поверхностными водными объектами. Нижний низкоомный объект на глубине 350-400 метров рассматривается как резервуар, содержащий минерализованную термальную воду. На смежных геоэлектрических разрезах в высокоомном фундаменте (глубина 450 м) и над ним (300-350 м) горизонтальная протяженность подземного геотермального резервуара достигает 200 м. Контрастные высокоомные части геоэлектрических разрезов коррелируют по глубинам залегания и соответствуют протяженным пластам уплотненных песков и валуников. На глубине 400-450 м они маркируют нижнюю

структурную границу – кровлю плотного фундамента депрессии. Геотермальный резервуар располагается в его верхней дезинтегрированной части и частично совмещен с древней корой выветривания.

### Обсуждение

#### Поверхностные тепловые потоки региональных разломов по данным ДЗЗ

Для сопоставления данных радиационных измерений со спутника и величин ПТП на элементах геоструктуры в одинаковой размерности переход от яркости, определенной по данным ИС,  $L$  (мВт/м<sup>2</sup>-ср-мкм) к единицам мощности поверхностного теплового потока Вт дается в соотношении:

$$F = L \cdot G, \quad (4)$$

где  $F$  – поток,  $L$  – яркость,  $G$  – геометрический фактор (Госсорг, 1988). После вычисления геометрического фактора  $G$  остается определение  $F$ , ПТП с участием радиационной яркости уходящего потока в виде:

$$F = 6.8704 \cdot L, \text{ мВт}, \quad (5)$$

Поверхностный тепловой поток  $F$  мВт, мВт/м<sup>2</sup> соответствует эффективному излучению поверхности разломов. Баланс ПТП представлен суммой:

$$F = F_{zp} + F_{кон} + F_{фх} + F_{зл} + F_{эс}, \quad (6)$$

где  $F_{zp}$  – тепловой поток тепловой инерции,  $F_{кон}$  – тепловой поток конденсации-кристаллизации водяного пара,  $F_{фх}$  – тепловой поток окисления почвогрунтовых газов,  $F_{зл}$  – глубинный компонент ПТП или доля тепла из верхней коры,  $F_{эс}$  – вклад лесных экосистем в гумидных областях (Вилор и др., 2015). Из зависимости интенсивности уходящего ИК потока от термодинамической температуры поверхности и стабильности величин  $F$  начала зимы графически определена мощность квазиста-

ционарного потока центральной части термозоны, равная  $0.0145 \pm 0.00027$  Вт. Это значение экстраполировано на малую термозону и является энергетической характеристикой уходящего ИК излучения. С учетом протяженности изученной части положительных термозон (Рис. 4 В-Г) 26.4 км и 5.6 км соответственно и площадей на них вычислена интегральная мощность уходящего поверхностного излучения в тепловом диапазоне, принимаемая как «тепловой потенциал» в зоне динамического влияния ЮБР:

термозон	площадь, кв. км	«тепловой потенциал»
центральная	80.52	1.168 МВт
малая	9.54	0.138 МВт
удельная мощность	1	14.435 КВт / км <sup>2</sup>

Из определений квазистационарных потоков приразломного уходящего поверхностного ИК излучения (Вилор и др., 2008) и величин ПТП рассчитаны запасы первичной тепловой геотермальной энергии, содержащейся в приповерхностных частях верхней коры БРЗ на крупнейших региональных сейсмо- и термоктивных разломах, контролирующих распределение ГП. Запасы прочих категорий ГР, таких как тепло грунтов, пластовых вод и горячих сухих пород количественно на порядки уступают приразломной тепловой эмиссии в виде ИК излучения. Прогнозируемый тепловой потенциал доступных ГР южного Прибайкалья, представленных комплексом природных неисчерпаемых источников первичной тепловой энергии, включает (МДж / м<sup>3</sup> / % от суммы) (Вилор и др., 2013):

- тепловые запасы грунтов – 107.854 / 5.4;
- термальные воды: термальные источники и пластовые воды – 23.434 / 1.1;
- тепловые запасы прогретых и горячих сухих пород, ГСП – 1874.16 / 93.5;

- тепловую эмиссию линейных аномалий уходящего инфракрасного ИК излучения от поверхности региональных сейсмоактивных разломов – 143.28 · 10<sup>6</sup> ГДж.

Тепловые ресурсы, экспонируемые ИК излучением разломов, превосходят на 6 порядков по теплосодержанию учтенные виды ГР южного Приангарья и Прибайкалья. Они характеризуют, хотя и приближенно, планетарный радиационный теплообмен верхней коры БРЗ с атмосферой.

Приразломные ГП, локализованные в пределах дериватов геотермальных резервуаров, проявлены значительно меньшими тепловыми мощностями (Табл. 2). Расчет обусловлен количеством используемых скважин и ограничен недостаточной изученностью дебитов и подземных стоков ГП. Площадь поверхности приразломных ГП обычно меньше 1-2 кв. км. Поэтому при имеющемся разрешении на спутниковых изображениях около 1 км<sup>2</sup> они выделяются неконтрастно.

В результате комплексных исследований с применением ДЗЗ, метода ЗСБ-МПП, измерений температуры грунтов и геохимического опробования установлено расположение подземного геотермального ре-

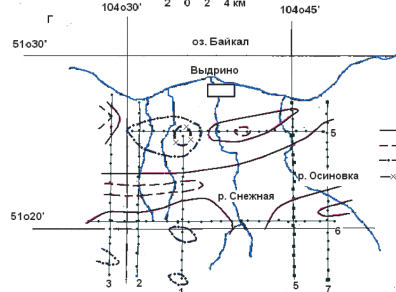
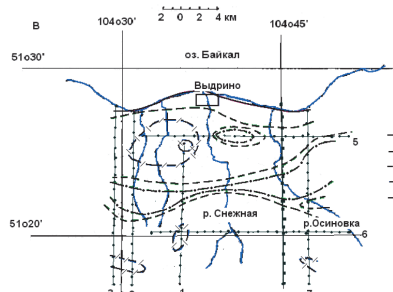
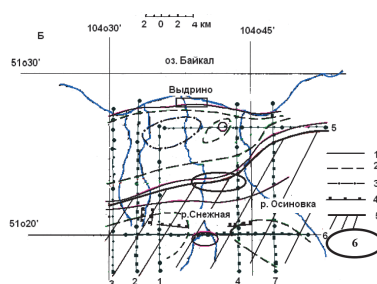
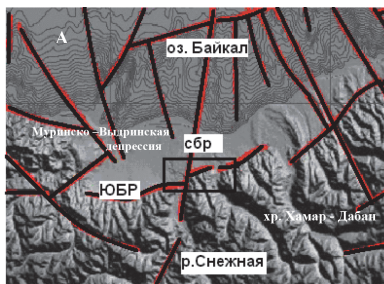


Рис. 4. Распределение яркостной температуры уходящего поверхностного ИК излучения в краевой части Муринско-Выдринской депрессии по данным ИС EOS. А – Структура разломов депрессии (Лунина и др., 2010). Прямоугольник – участок проведенных исследований, сбр – выход Снежинского сброса. Б-Г – изотермы яркостной температуры, К, октябрь-декабрь 2012 соответственно. Б – сцена 4.10.2012. 1-3 – изотермы, 1 – 275, 2 – 273, 3 – 270, 4 – новейшие сейсмодислокации. 5 – северная граница сейсмоактивной зоны, 6 – участок проведения поисков геотермального резервуара методом ЗСБ-МПП. В – 1-5 изотермы, 1 – 270, 2 – 252, 3 – 253, 4 – 240, 5 – 239. Г – 1-4 изотермы, 1 – 250, 2 – 252, 3 – 245, 4 – 240.

Термо- и сейсмоактивный разлом	ПТП по данным ТКС, мВт	Приразломные ГП	Количество используемых скважин	Дебит скважин, л/с	Температура воды, °С	Рассчитанная тепловая мощность ГП, МВт
Тункинский	707.3	Аршан-Тункинский	8	4.5	41	6.16
Южно-Тункинский	628.6	Жемчук	2	5 – 8	40 – 51.5	2.16 – 2.68
Южно-Байкальский	678.8 (*180)	Питателевский, Сухая	3	4.5	68.5	3.87
Туркинский	608.6	Горячинск	2	0.2	27.5–50	0.04–0.08
Ниловский	655.9	Нилова Пустынь	2	4.9	53.8	2.2
			2	13	43.5	4.72

Табл. 2. Рассчитанные тепловые мощности приразломных ГП южного Прибайкалья. Примечание: ПТП рассчитан по данным системы ИС NOAA (программа ENVI 4), (\*) расчет по данным системы ИС EOS (программа ENVI 4.4).

зервуара в разрезе на пересечении ЮБР и Снежинского сброса (Рис. 5). Резервуар локализован в нижней части сброса, затухающего в поверхностных ледниковых отложениях. Он связан с формированием ГП в висячем крыле ЮБР и ограничивается в северном направлении подпором со стороны водной массы оз. Байкал. Объем подземного геотермального резервуара по смежным геоэлектрическим профилям достигает  $175 \cdot 65 \cdot 75 \text{ м}^3$ .

Рассчитанные прогнозные геотермальные ресурсы резервуара составляют:

- объем –  $853125 \text{ м}^3$ ;
- оценочные запасы воды при открытой пористости 10 % –  $85313 \text{ м}^3$ ;
- ожидаемая температура воды по аналогии с термальными водами Усть-Селенгинского артезианского бассейна (Бадминов и др., 2012) –  $25 \text{ t } ^\circ\text{C}$ ;
- возможный дебит (Голубев, 2007)  $D$  – 100 л/с;
- теплосодержание, тепловой потенциал геотермального резервуара  $Q_{рез} = M \cdot C_{pw} \cdot \Delta t$ , где  $M$  – масса, кг,  $C_{pw}$  – удельная теплоемкость, воды, кДж/кг·град,  $\Delta t$  – разность температур –  $600.558 \cdot 10^4 \text{ } ^\circ\text{C}$ , ГДж;

• тепловая мощность,  $N = D \cdot C_{pw} \cdot \Delta t$  – 7.039 МВт;

• гидрохимический тип вод по аналогии с водами Усть-Селенгинского артезианского бассейна (Бадминов и др., 2012) – азотные, гидрокарбонатно-натриевые.

При экономическом анализе технологии применения ГР в Прибайкалье с сооружением геотермальных теплонасосных установок, ТНУ, использующих первичную тепловую энергию грунтов и термальных вод, сопоставление рассчитанных стоимостей тепла из геотермального теплоисточника с тарифом тепловой энергии, отпускаемой ОАО «Иркутскэнерго» потребителям Иркутской области проявляется, казалось бы, невысокая экономическая эффективность теплонасосного оборудования.

Но из-за большой разницы тарифов оплаты в зависимости от района расположения потребителя и производителя тепла, теплоснабжение с привлечением ТНУ эффективно для вложения средств за счет их окупаемости в относительно непродолжительные сроки (Толстой и др., 2012). Расчетом технико-экономического обоснования ТНУ на примере бальнеокурорта Горячинск (Бурятия, Восточная Сибирь) убедительно показано, что замена старых угольных котельных на ТНУ снижает эксплуатационные расходы по производству тепла в 2 раза (Толстой и др., 2012, Мороз и др., 2011). Эколого-экономическое значение использования рассчитанных запасов ГР находит эквивалент теплосъема с  $1 \text{ м}^3$  грунта, ГСП или пластовой воды сжиганию 70 кг условного топлива.

## Заключение

Элементы поверхностной геоструктуры при участии активных региональных разломов выделяются аномалиями интенсивности и контрастности уходящего поверхностного ИК излучения, соответствующего эмиссии электромагнитного излучения в длинном, инфракрасном ТИР диапазоне, фиксируемого методами ДЗЗ с привлечением ТКС. При картировании распределения поверхностного ИК излучения используются такие характеристические особенности, как:

- ИК излучение с повышенной интенсивностью располагается на поверхности сейсмически активных современных разломов и определенных литологических комплексов,
- поверхностные формы аномального уходящего ИК излучения наблюдаются в виде линейной, линейно-контурной, полосовидной и ареальной разновидностей,
- ИК излучение первых 2-х разновидностей локализовано на приразломных тектогенных склонах независимо от их экспозиции относительно дневной солнечной радиации,

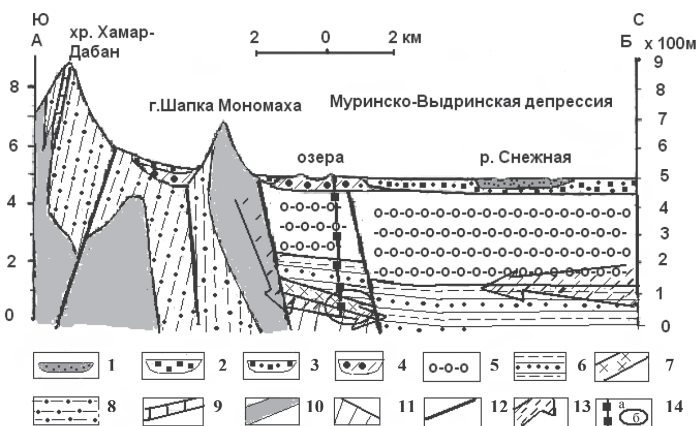


Рис. 5. Геологический разрез южной краевой части Муринско-Выдринской депрессии – 1-5 четвертичные отложения – 1 – аллювий; 2 – материал подножий склонов, пролювий; 3 – отложения водно-ледниковые; 4 – отложения ледниковые, морена; 5 – шанхайская свита, мелкогалечники, пески; 6 – верхнетретичные отложения, танхойская свита, переслаивание слабо угленосных песков, алевролитов; 7 – мел-палеоген, кора выветривания, 8-10 – блок хр – Хамар-Дабан: 8 – рифей, корниловская свита, гнейсы, мигматиты, 9 – слои мраморов, 10 – хамар-дабанский интрузивный комплекс: граниты лейкократовые, биотитовые, пегматиты; 11 – фундамент депрессии; 12 – разломы; 13 – направление гидравлического напора, 14а – рекомендуемая поисковая буровая скважина, 14б – предполагаемое расположение геотермального резервуара.

- проекция излучающей поверхности сужается с увеличением крутизны склонов, до средней ширины 4–6 км, у двух последних разновидностей она расширяется до 35 км,
- линейная и линейно-контурная разновидности уходящего излучения характеризуются узкими максимумами интенсивности, у полосовидной и ареальной они более широкие с градиентами в краевых частях,
- излучение наиболее контрастно в ночное время осеннего и зимнего сезонов; на заснеженной поверхности все локальные объекты отчетливо выделяются повышенным уровнем собственной ИК эмиссии.

Доступные тепловые ресурсы ГП находятся в контурах региональных аномалий уходящего ИК излучения сейсмоактивных разломов, устанавливаемых ТКС. Их тепловые ареалы участвуют в формировании поверхностного теплового потока, фиксируемого ИС. Геотермальный объект, изученный в южном Прибайкалье, связан наземной аномалией поверхностного уходящего ИК излучения на трассе сейсмоактивного, термоактивного ЮБР. Определения интенсивности аномального ИК излучения методами ДЗЗ в комплексе с расчетом геохимических потоков и геофизическими измерениями открывают перспективы поисков геотермальных резервуаров со скрытыми ГП для обеспечения запасов геотермальных ресурсов, остро дефицитных в южном Прибайкалье Иркутской области. Оценка ресурсов выявляемого подземного геотермального резервуара тем более актуальна, что эксплуатация его термальных вод обеспечит расширение и создание инфраструктуры бальнеологического курортного центра и необходимых рабочих мест для населения близко расположенного г. Байкальск, имеющего проблемы трудоустройства в связи с недавним закрытием Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.

## Литература

- Бадминов П.С., Иванов А.В., Писарский Б.И., Оргильянов А.И. Окинская гидротермальная система (Восточный Саян). *Вулканология и сейсмология*. 2013. № 4. С. 27-39.
- Бадминов П.С., Миromanов А.В., Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Тарасов И.А., Степаненко А.В. Перспективы поисков термальных вод в Усть-Селенгинском артезианском бассейне. *Подземная гидросфера*. Иркутск: ООО Географ. 2012. С. 285-288.
- Вилор Н.В., Минько Н.П. Инфракрасное излучение Саяно-Байкальской горной области и Байкальской рифтовой зоны по данным спутникового мониторинга. *Доклады РАН*. 2001. Т. 379. № 5. С. 666-669.
- Вилор Н.В., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю. Методы тематического спутникового мониторинга: уходящее поверхностное излучение Земли, как экологический фактор. *Инженерная экология*. 2008. № 4. С. 32-50.
- Вилор Н.В., Толстой М.Ю., Ярина Н.А. Геотермальные ресурсы БРЗ как возобновляемые неисчерпаемые источники первичной тепловой энергии для теплоснабжения населенных пунктов Прибайкалья. *Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы*. Иркутск. ИЗК СО РАН, ИГУ. 2013. Т. 1. С. 62-67.
- Вилор Н.В., Андрулайтис Л.Д., Зарубина О.В., Данилов Б.С.

Геохимия сейсмоактивных региональных разломов (Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь). *Геохимия*. № 1. 2015.

Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Гео. 2007. 224 с.

Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая, аэрокосмическая съемка. М: Недра. 1993. 128 с.

Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М: Мир. 1988. 399 с.

Дучков А. Д., Соколова Л.С. Атлас геотермических карт Сибири. Новосибирск. ОИГГГиМ. СОРАН. 2000. [Электронный ресурс].

Кустов Ю.И., Лысак С.В. Термальные воды юга Восточной Сибири. Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 6. С. 880-895.

Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука. 1974. 166 с.

Ломоносов И.С., Кустов Ю.А., Пиннекер Е.В. Минеральные воды Прибайкалья. Иркутск. Вост.-Сиб. книжн. изд-во. 1977. 223 с.

Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири. *ДАН*. 2010. Т. 411. № 5. С. 662-667.

Лысак С.В. Геотермические условия и термальные воды южной части Восточной Сибири. М: Наука. 1968. с. 120.

Лысак С.В. Тепловой поток континентальных рифтовых зон. Новосибирск: Наука. 1988. 199 с.

Лысак С.В. Тепловой поток в зонах активных разломов на юге Восточной Сибири. Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 8. С. 791-803.

Мороз М.В., М.Ю.Толстой, Н.В.Вилор. Вариант конструкции первой в Восточной Сибири геотермальной станции для теплоснабжения курорта «Горячинск» (Бурятия). *Вестник ИрГТУ*. 2011. № 9. С. 162-168.

Толстой М.Ю., Вилор Н.В., Соболев А.В., Мороз М.В. Экономические параметры геотермальной установки теплоснабжения на рекреационном объекте в охраняемой природной зоне. *Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири*. Иркутск. изд-во ИрГТУ. 2012. Вып. 12. С. 103-110.

Хромовских В.С. Сейсмогеология южного Прибайкалья. М: Наука. 1965. 122 с.

## Сведения об авторах

*Николай Васильевич Вилор* – профессор-совместитель кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения Национального исследовательского Иркутского технического университета, доктор геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник Института геохимии СО РАН.

Тел: (3952) 40-51-43, (3952) 42-26-45, e-mail: vilor@igc.irk.ru

*Михаил Юрьевич Толстой* – канд. тех. наук, профессор, заведующий кафедрой инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения Национального исследовательского Иркутского технического университета.

Тел: (3952) 40-56-09, e-mail: tolstoi@istu.edu

Национальный исследовательский Иркутский технический университет. Иркутск-74, ул. Лермонтова 71, тел. служ.(3952) 40 56 09, e-mail: tolstoi@istu.edu

*Михаил Александрович Вилор* – аспирант, Институт географии СО РАН

Иркутск-33, ул. Улан-Баторская 1  
Тел: (3952) 42-70-16, e-mail: mvilor@rambler.ru

## Earth remote sensing for exploration and evaluation of geothermal resources in the south of Eastern Siberia (Russia)

N.V. Vilor, M.Yu. Tolstoy, M.A. Vilor

<sup>1</sup>National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Geography, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia  
e-mail: vilor@igc.irk.ru

**Abstract.** Prospects for a long-term heat supply of settlements and enterprises in a protected southern Baikal region consist in replacement of fossil fuels to ecologically friendly low potential free primary thermal energy, inexhaustible reserves of which is in Baikal Rift Zone. The aim of the article is to study and evaluate its geothermal resources with Earth remote sensing, such as thermal space survey together with geological, geochemical and geophysical electromagnetic exploration. According to thermal space survey from artificial satellites of the Earth, spatial setting and genetic connection of outgoing surface infrared radiation are established in seismically and thermally active faults of different kinematics in Baikal Rift Zone.

In this study of the southern Baikal region with thermal space survey, remote measurements of brightness temperature are used from radiometer MODIS on artificial satellites of EOS system. Ground survey combines measurements of thermodynamic temperature, ground surface and ground water, geochemical sampling of soil, ground and rocks in faults, as well as electromagnetic geophysical studies such as transient electromagnetic method and near-field transient electromagnetic sounding. The search and assessment of geothermal resources are focused in Tunkino-Baikalsky anomaly of outgoing surface infrared radiation, exposing outputs of regional seismic, thermoactive South-Tunkinsky, Main Sayansky and South-Baikalsky faults.

On South-Baikalsky fault brightness temperature of anomalous peaks differs from the background in October-December by 6-15 K. Its position on measurement profiles is permanent. Quasi-stationary flow of the central thermal zone of South-Baikalsky fault is equal to  $0.0145 \pm 0.00027$  W with a specific capacity 14.435 kW/km<sup>2</sup>, which corresponds to thermal potential of the fault. As a result of comprehensive research location is established of underground geothermal reservoir in fault-line tectonic zone at a depth of 350-400 m and thermal capacity of 7.039 MW. Identification of these geothermal resources is of great importance, as their exploitation will provide infrastructure expansion, development of local balneology and creation of jobs for Baikalsk citizens due to the elimination of the Baikal pulp and paper plant.

**Keywords:** Baikal rift zone, surface infrared radiation of faults, heat flow, capacity, temperature, thermal water, geothermal resources.

## References

- Badminov P.S., Ivanov A.V., Pisarskiy B.I., Orgil'yanov A.I. Okinsky hydrothermal system (Eastern Sayan). *Vulkanologiya i seysmologiya* [Volcanology and Seismology]. 2013. № 4. Pp. 27-39. (In Russian)
- Badminov P.S., Miromanov A.V., Orgil'yanov A.I., Kryukova I.G., Tarasov I.A., Stepanenko A.V. Future thermal water prospect in Ust-Selenga artesian basin. *Podzemnaya gidrosfera* [Underground hydrosphere] Irkutsk: OOO Geograf. 2012. Pp. 285-288. (In Russian)
- Vilor N.V., Min'ko N.P. Infrared radiation of the Sayano-Baikal mountain region and the Baikal Rift Zone according to satellite monitoring. *Doklady RAN* [Proc. of the Russian Academy of Sciences]. 2001. V. 379. № 5. Pp. 666-669. (In Russian)
- Vilor N.V., Klyuchevskiy A.V., Dem'yanovich V.M., Rusanov V.A., Sharpinskiy D.Yu. Methods of thematic satellite monitoring: outgoing radiation from the Earth surface as an environmental factor.

*Inzhenernaya ekologiya* [Engineering ecology]. 2008. № 4. Pp. 32-50. (In Russian)

Vilor N.V., Tolstoy M.Yu., Yarina N.A. Geothermal resources RHL as renewable inexhaustible sources of primary thermal energy for heating settlements of the Baikal region. Irkutsk. IZK SO RAN, IGU. 2013. V. 1. Pp. 62-67. (In Russian)

Vilor N.V., Andrulaytis L.D., Zarubina O.V., Danilov B.S. Geochemistry of seismically active regional faults (Baikal rift zone, Eastern Siberia). *Geokhimiya* [Geochemistry]. № 1. 2015. Pp. (In Russian)

Golubev V.A. The conductive and convective heat loss in the Baikal rift zone. Novosibirsk: Geo Publ. 2007. 224 p. (In Russian)

Gornyy V.I., Shilin B.V., Yasinskiy G.I. Heat aerospace survey. Moscow: Nedra Publ. 1993. 128 p. (In Russian)

Gossorg Zh. Infrared thermography. Moscow: Mir Publ. 1988. 399 p. (In Russian)

Duchkov A. D., Sokolova L.S. Atlas of geothermal maps of Siberia. Novosibirsk. OIGGGiM. SORAN. 2000. [Internet resource] (In Russian)

Kustov Yu.I., Lysak S.V. Thermal waters of the South of Eastern Siberia. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics]. 2000. V. 41. № 6. Pp. 880-895. (In Russian)

Lomonosov I.S. Geochemistry and formation of modern hydrotherms of the Baikal Rift Zone. Novosibirsk: Nauka. 1974. 166 p. (In Russian)

Lomonosov I.S., Kustov Yu.A., Pinneker E.V. Mineral waters of the Baikal region. Irkutsk: Vost.-Sib. knizhn. izd-vo. 1977. 223 p. (In Russian)

Lunina O.V., Gladkov A.S., Sherstyankin P.P. New electronic map of active faults of the South of Eastern Siberia. *DAN* [Proc. of the Academy of Sciences]. 2010. V. 411. № 5. Pp. 662-667. (In Russian)

Lysak S.V. Geothermal conditions and the thermal waters of the southern part of Eastern Siberia. Moscow: Nauka Publ. 1968. 120 p. (In Russian)

Lysak S.V. Heat flow of continental rift zones. Novosibirsk: Nauka Publ. 1988. 199 p.

Lysak S.V. Heat flow in active fault zones in the South of Eastern Siberia. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics]. 2002. V. 43. № 8. Pp. 791-803. (In Russian)

Moroz M.V., Tolstoy M.Yu., Vilor N.V. Alternative design of the first in Eastern Siberia geothermal station for heating resort «Goryachinsk» (Buryatia). *Vestnik IrGTU* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2011. № 9. Pp. 162-168. (In Russian)

Tolstoy M.Yu., Vilor N.V., Sobolev A.V., Moroz M.V. Economic parameters of geothermal heating plant on recreational object in a landscape protection area. *Problemy osvoeniya mineral'noy bazy Vostochnoy Sibiri* [Problems of mineral base exploitation of Eastern Siberia]. Irkutsk: izd-vo IrGTU. 2012. Is.12. Pp. 103-110. (In Russian)

Khromovskikh V.S. Seismogeology of the Southern Baikal region. Moscow: Nauka Publ. 1965. 122 p. (In Russian)

## Information about author

*Nikolai V. Vilor* – professor, Department of Engineer Communications and Life Safety Systems, National Research Irkutsk Technical University ; Leading Researcher, Doctor of Sciences (Geol. and Min.), Institute of Geochemistry SB RAS.

Phone: (3952) 40-51-43, (3952) 42-26-45, e-mail: vilor@igc.irk.ru

*Michail U. Tolstoy* – PhD (Tech.), Professor, Head of Department of Engineer Communications and Life Safety Systems, National Research Irkutsk Technical University

Phone: +7(3952) 40-51-43, e-mail: tolstoi@istu.edu  
National Research Irkutsk Technical University  
664074, Russia, Irkutsk, Lermontov St., 71

*Michail A. Vilor* – PhD student, Institute of Geography, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

664033, Russia, Irkutsk, Ulan-Bator St., 1  
Phone: +7(3952) 42-70-16, e-mail: mvilor@rambler.ru