

Верификация результатов дистанционного геотермического метода при изучении природы формирования аazonальной экосистемы Большого Соловецкого острова

В.И. Горный, И.Ш. Латыпов, Т.Е. Теплякова, Е.Ю. Воякина

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр
экологической безопасности РАН
197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18
E-mail: v.i.gornyy@ecosafety-spb.ru*

Применение дистанционного геотермического метода (по материалам многоцветной съемки спутником NOAA(AVHRR)) на территории Северной Карелии, акватории Белого моря, Кольского полуострова и северной части Архангельской области выявило ряд локальных аномалий конвективного теплового потока, достигающих 25 Вт/м^2 . Одна из них – Сосновская тепловая аномалия расположена в северной части Большого Соловецкого острова. Значения конвективного теплового потока (повышенный вынос эндогенного тепла) в пределах Сосновской тепловой аномалии составляют значимую долю от среднесуточных значений солнечной инсоляции в летний период, что должно влиять на формирование растительности острова. Для проверки этой гипотезы выполнено тектоническое дешифрирование материалов спутника Landsat ETM+, позволившее утверждать, что Большой Соловецкий остров представляет собой палеовулканическую структуру. Анализ же температуры поверхности озер Б.Соловецкого острова (по данным теплового канала спутника Landsat ETM+) выявил ряд озер с повышенной температурой поверхности. Многолетние наземные исследования, включавшие измерение температуры воды в озерах, отбор проб воды на химический анализ и исследование фитопланктона, описание растительных сообществ, позволили объяснить наличие ареала теплолюбивой растительности в пределах Сосновской тепловой аномалии - влиянием повышенного выноса эндогенного тепла Земли.

Ключевые слова: тепловой поток, тепловая съемка, неморальная растительность, Большой Соловецкий остров, тектоника, тепломассоперенос.

Введение

До конца 70-х годов прошлого века применение тепловой аэросъемки [1] для картографирования теплового потока (ТП) из земных недр ограничивалось районами современного вулканизма [2]. По данным определений ТП в глубоких скважинах было известно, что на платформах его пространственная изменчивость составляет всего десятки мВт/м^2 [3-6]. На этом основании было показано [7], что такие малые контрасты ТП не могут создавать дистанционно обнаруживаемые контрасты температуры земной поверхности (ТЗП). Поэтому был сделан вывод о нецелесообразности применения тепловой аэросъемки для картографирования аномалий ТП за пределами районов современного вулканизма [7].

Тем не менее, в середине 70-х годов прошлого века была введена в эксплуатацию система спутников NOAA, оборудованных сканирующим радиометром AVHRR. Этот прибор имеет ИК-тепловые каналы. Анализ тепловых изображений с этих спутников показал, что на ночных тепловых космических снимках в ряде мест наблюдаются региональные линейные и площадные положительные контрасты ТЗП, значения которых составляют **первые градусы**. Такие линейные зоны, получившие название «термальные линии», выявлены у подножий многих горных систем: - Копетдаг [8]; - Урал [9, 10]; - Кавказ [11]; - Гималаи и Сулеймановы горы на полуострове Индостан. Линейные зоны повышенной ТЗП, также, обнаружены и на территории

внутриконтинентальных рифтов [12]. Ярким таким примером является Рейнский грабен (рис. 1), где «термальные линии» индицируют ограничивающие грабен глубинные разломы.

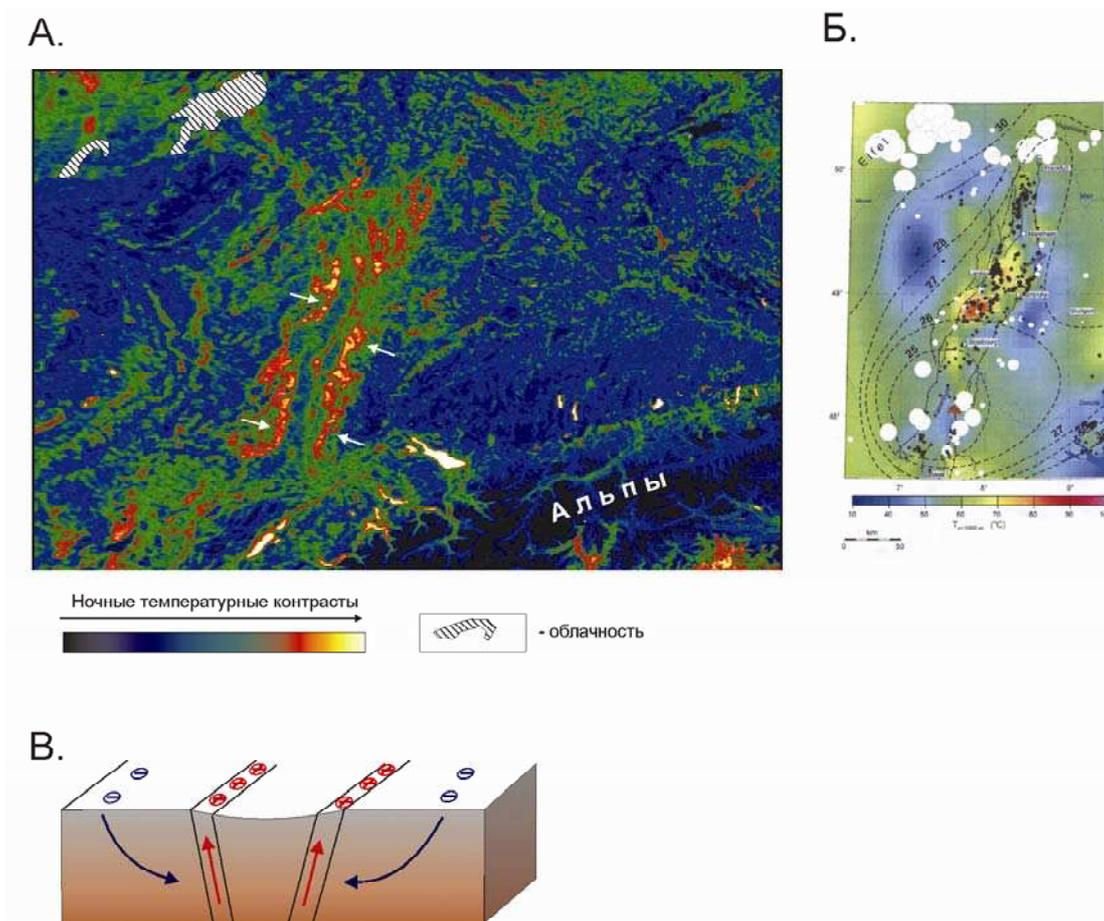


Рис. 1. «Термальные линии» Рейнского грабена.

А – карта ночных температурных контрастов (по материалам съемки спутником NOAA(AVHRR)).

Стрелками показаны линейные положительные контрасты ночной температуры поверхности, индицирующие глубинные разломы.

Б – карта температуры пород в Рейнском грабене на глубине 1 км по данным измерений в скважинах (показаны звездочками) [13]. Глубинные разломы показаны линиями с бергштрихами.

Пунктиром показаны изолинии глубины поверхности Мохо. Белыми кружками – процент содержания мантийного гелия в пробах воды или газа.

В – модель конвекции подземных флюидов в Рейнском грабене, построенная по результатам математического моделирования и наблюдений в скважинах (по Х. Клаузеру (С. Clauser) [13]).

Цветными стрелками и знаками в кружках показаны направления движения подземных флюидов. Синими в областях просачивания, красными в зонах ограничивающих грабен глубинных разломов

Исходя из закономерностей формирования ТЗП [1] трудно объяснить наличие столь протяженных линейных аномалий другими факторами, кроме как за счет интенсивного выноса эндогенного тепла. Пространственное совпадение «термальных линий» с известными глубинными разломами горных систем и внутриплитных рифтов (см. рис. 1 А и Б) навело на мысль о широком развитии теплопереноса в зонах разломов (ранее это отмечалось В.И. Лялько [15, 16] на примере Файзабадского, Токтогульского и Фрунзенского тестовых полигонов). Теплоперенос, по сравнению с кондуктивной теплопередачей, является значительно более эффективным механизмом диссипации внутренней энергии Земли. Поэтому можно ожидать возрастание ТП в пределах «термальных линий» [17-20].

Вероятно впервые, И.И. Никшичем [21] на примере Копетдага, предложена модель формирования термальных вод, предусматривающая просачивание метеорных вод на глубину и последующую их разгрузку на уровне грунтовых вод в зонах разломов. По этой модели, слагающие Копетдаг трещиноватые известняки являются зоной просачивания метеорных вод. Проникая в более нагретые глубокие горизонты, температура метеорных вод повышается. При достижении на глубине Копетдагского разлома, эти воды под действием гидростатического давления поднимаются по нему и разгружаются на уровне грунтовых вод. Такой механизм, базирующийся на разности гипсометрических уровней зон просачивания и разгрузки, позволяет объяснить появление на тепловых космических снимках «термальных линий» как для обрамлений горных систем, так и для Байкальской рифтовой зоны [12, 22]. В пределах же Рейнского грабена Х. Клаузер [13, 14] показал, что следует ожидать наличие как свободной, так и вынужденной конвекции подземных флюидов, приводящей к их подъему по обрамляющим грабен глубинным разломам, что может повысить температуру приповерхностных отложений до десяти градусов. Для этого скорость подъема флюидов должна превышать 10^6 м/с. Этот механизм позволяет объяснить наблюдаемые линейные зоны повышенной ТЗП, индицирующие глубинные разломы, ограничивающие Рейнский грабен (рис. 1А).

Таким образом, результаты определений ТП в скважинах не объясняют появление отмеченных выше повышений ТЗП над региональными глубинными разломами. В связи с этим, ниже излагаются аргументы, позволяющие утверждать, что общая теплоотдача Земли [6] недооценена по результатам скважинных определений.

Теплоотдача «термальных линий»

Допустим, что «термальные линии», регистрируемые тепловой космической съемкой формируются за счет диссипации внутренней энергии Земли. Прежде всего, выполним оценку значения ТП, который необходимо подвести к дневной поверхности, чтобы нагреть ее на один градус (контраст ТЗП, надежно регистрируемый спутниковыми съемочными системами). Предположим, также, что теплообмен дневной поверхности происходит по закону Ньютона [23]:

$$q(h_o) = \alpha [T(h_o) - t_a]; \quad (1)$$

где: h_o - нулевая глубина (поверхность почвы), м; $T(h_o)$ - температура поверхности почвы, °С; t_a – температура приземного слоя атмосферы, °С; α - коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$.

Из (1) следует, что превышение (контраст) ТП - $\Delta q(h_o)$ в области «термальной линии» по отношению к окружающему фону может быть представлен в виде:

$$\Delta q(h_o) = \alpha [T_m(h_o) - T_\phi(h_o)] = \alpha \Delta T(h_o); \quad (2)$$

где: $T_m(h_o)$ и $T_\phi(h_o)$ – соответственно, ТЗП в пределах «термальной линии» и окружающего фона, °С. Выражение (2) справедливо при малых (первые градусы) контрастах ТЗП - $\Delta T(h_o)$, которые незначительно влияют на температуру приземного слоя воздуха в пределах «термальной линии».

Коэффициент α зависит от типа охлаждающей поверхность субстанции (воздух для суши или вода для водоемов), скорости ветра, испарения влаги с поверхности. Для стандартных условий, например, лето, район Рейнского грабена, скорость ветра 2 м/с, влажность поверхностного слоя почвы 10%, тепловая инерция почвы 1000 ЕТИ¹, значения α , рассчитанные по модели суточного хода ТЗП [1] составляют около $12 \text{ Вт}/(м^2 \cdot ^\circ C)$. Исходя из (2) дополнительная к окружающей территории теплоотдача «термальной линии» нагретой на 1 °С составляет порядка $12 \text{ Вт}/м^2$. ТЗП в пределах «термальных линий» может быть выше окружающего фона на несколько градусов. Отсюда следует, что «термальные линии» характеризуются дополнительной теплоотдачей,

¹ ЕТИ – единиц тепловой инерции. ЕТИ = Дж/(м²*с^{1/2}*К)

значения которой может достигать десятков $Вт/м^2$. Полученные оценки на три порядка превышают значения ТП, определенные традиционным методом в глубоких скважинах. В связи с этим необходимо ответить на вопрос: «Может ли такая теплоотдача «термальных линий» быть обеспечена восходящим движением термальных вод по зоне разлома?»

Конвективный вынос эндогенного тепла в зонах разломов

Теоретические оценки значений ТП [13-20] показали, что при скоростях подъема подземных вод 10^{-6} м/с и выше над такими зонами следует ожидать контрасты ТЗП в первые градусы, а конвективный ТП, при этом, составляет десятки $Вт/м^2$. Экспериментально столь высокие конвективные ТП (до $37 Вт/м^2$, превышающие на три порядка средние значения кондуктивного ТП) были определены В.А. Голубевым [22] по результатам геотермических измерений на дне озера Байкал². Возможны и другие механизмы нагрева поверхностных отложений в зонах разломов.

Таким образом, имеющиеся теоретические исследования и результаты наблюдений показывают, что в зонах высокой проницаемости коры могут наблюдаться ТП, достигающие десятков $Вт/м^2$, которые могут создавать контрасты ТЗП, достигающие первых градусов. Это явилось обоснованием для разработки дистанционного геотермического метода [24, 25].

Возникает вопрос о причинах возможной недооценки значений ТП. Метод определения ТП в скважинах базируется на предположении о кондуктивной теплопередаче в земной коре. Поэтому, при наличии конвекции он дает большие ошибки в сторону недооценки значений ТП, т.к. по вертикальному распределению температуры пород в скважинах из-за мешающего влияния сезонных тепловых ритмов в верхней части разреза и отсутствия данных на больших глубинах часто трудно выявить режим теплопередачи (кондуктивный или конвективный).

Дистанционный геотермический метод (ДГМ)

Известно [1], что ТЗП зависит от плотности потока суммарной солнечной радиации поступающей на ЗП, альбедо ЗП, коэффициента излучения, тепловой инерции (ТИ), ТП из земных недр, влажности почвы, геометрии поверхности и структуры грунта, метеорологических условий, концентрации в атмосфере оптически активных газов (например, CO_2 , SO_2) и времени. Большое количество факторов влияющих на ТЗП не всегда позволяет путем визуального анализа пространственного распределения ТЗП выявлять участки с повышенными ТП. Поэтому для дистанционного измерения ТП необходимо "очистить" исходные результаты съемки от влияния других факторов. Для этого разработан специальный алгоритм [24,25], базирующийся на математической модели суточного хода ТЗП [1]. В результате обработки результатов многократной (выполненной в различное время суток) тепловой космической съемки строятся карты ТП, ТИ и скорости испарения влаги с ЗП.

Среднеквадратическая погрешность определения ТП дистанционным геотермическим методом, полученная по результатам независимых повторных космических съемок городов составила $\sigma = 10 Вт/м^2$ для изолированного пикселя. Если же выявленная аномалия ТП регистрируется N пикселями (где N – количество пикселей, составляющих область высокого ТП), т.е. представляет собой связную область изображения, то среднеквадратическая погрешность дистанционного определения среднего значения ТП в пределах аномалии будет порядка $\sigma = 10/N^{1/2} Вт/м^2$.

² По нашему мнению значения конвективного ТП, полученные для озера Байкал недооценены. Это легко проверить, используя данные В.А.Голубева (рис. 11 [22] и значения коэффициента турбулентной теплопроводности воды $\lambda_m = 414 Вт/(м*К)$ [28]).

Для изучения пространственного распределения ТП в Беломорском регионе использовались материалы, полученные спутником NOAA(AVHRR) (чувствительность инфракрасных датчиков 0.12 K, геометрическое разрешение на местности ~ 1.1 км. С целью выявления региональных закономерностей распределения ТП, полученные данные были усреднены в пределах квадратов 11×11 км. Далее из полученных значений было вычтено среднее для Беломорского региона значение ТП. Результатом явилась карта положительных приращений ТП (рис. 2) для поверхности суши (акватории замаскированы).

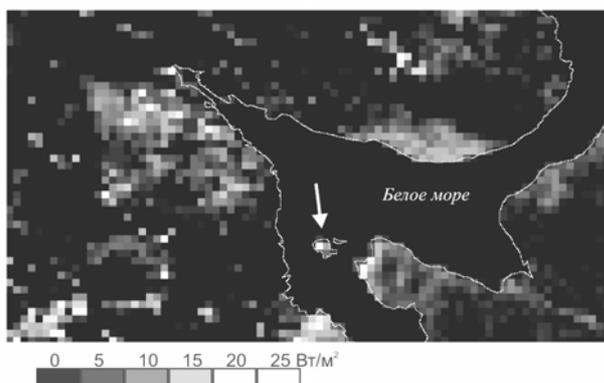


Рис. 2. Карта значений ТП, превышающих средний уровень Беломорского региона. Сосновская аномалия ТП на Большом Соловецком острове показана стрелкой.

сделать вывод о том, что Б. Соловецкий остров представляет собой молодую вулканоплутоническую структуру [27].

Признаки высокого ТП на Б. Соловецком острове

В связи с принципиальными различиями в оценках значений ТП, получаемых скважинными и спутниковыми методами, для верификации были использованы подходы, базирующиеся на наблюдении природных явлений, вызванных этими потоками. К ним относятся:

- снеговой калориметрический метод [29], основанный на измерении количества тепла и времени, необходимого для стаивания снега в местах высоких ТП;
- геоботанический (индикаторный) метод [29,30], базирующийся на зависимости видового состава растительности от температуры почвы и, соответственно, от уровня ТП. Например, сосны не растут на участках с ТП выше 4 Вт/м^2 , когда температура почвы на глубине 15 см превышает $40 \text{ }^\circ\text{C}$ [30], поэтому отсутствие сосен и проплешины в лесу могут индцировать интенсивный конвективный вынос эндогенного тепла;
- субаквальная разгрузка рудиментов гидротерм в озерах [27].

Для реализации в индикаторном варианте снегового калориметрического метода были проанализированы материалы спутников высокого разрешения Terra(ASTER) и Landsat TM, полученные в период начала снеготаяния (рис. 3). Выявлено, что в начале апреля, до начала общего таяния снегового покрова в районе п. Реболда на двух озерах наблюдаются признаки опережающего схода ледового покрова (более темный тон на озерах 1,2 на рис. 3 А по сравнению с другими озерами, например 3). Кроме того, вокруг озера 2 появилось темное обрамление, которое отсутствует на летнем снимке (рис. 3 Б). Эти факты указывают на признаки опережающего снеготаяния, которые могут наблюдаться на участках с высоким (десятки Вт/м^2) ТП. Измерения в озерах 1 и 3 показали специфику вертикального распределения температуры воды в озере 1

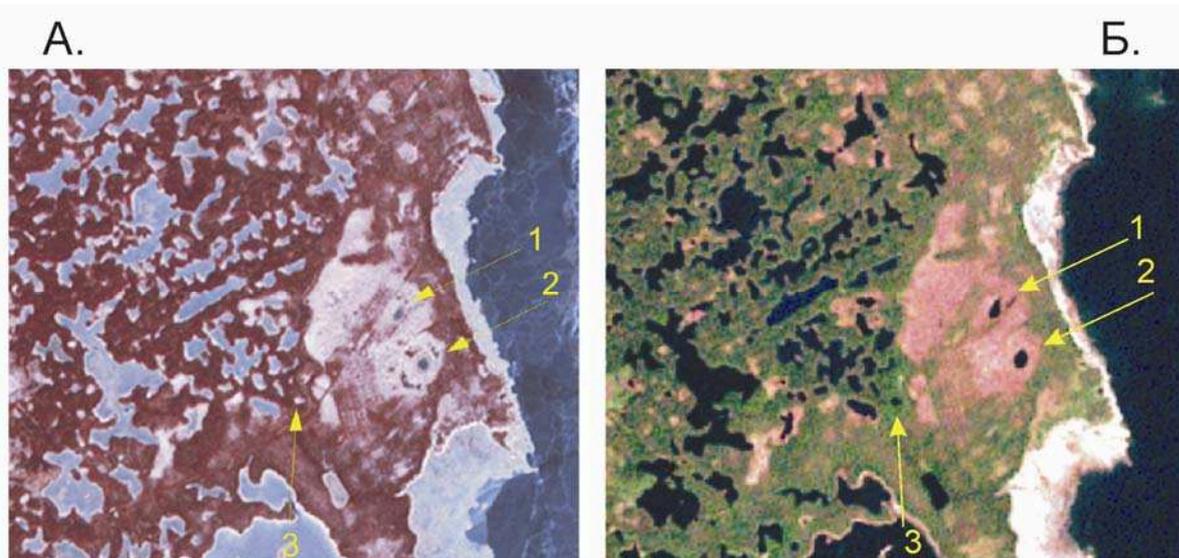


Рис. 3. RGB-цветовые композиты на С-В часть Б. Соловецкого острова: А. (ASTER/Terra). Весенний аспект, до снеготаяния (09.04.2005 г.). Б. Landsat TM. Летний аспект (21.06.2006г.)

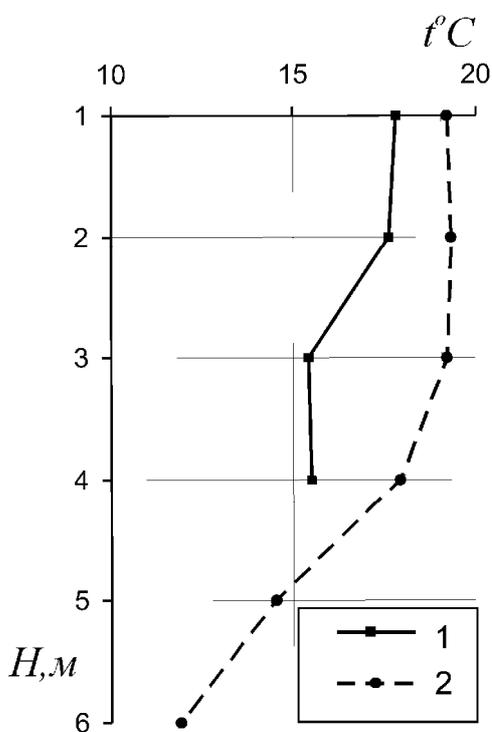


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры воды в озерах:

1. Озеро 1 на рис. 3.
2. Озеро 3 на рис. 3.

практически сразу возле берега. В озере же 1 глубина увеличивается достаточно монотонно с расстоянием от берега. В «теплых» озерах наблюдается резкое снижение температуры воды до $\sim +4,0$ °C уже на глубине 4 м, после чего температура воды остается постоянной до самого дна. В озере же 1 температура на глубине 2 м на $\sim +4,5$ °C выше, чем в «теплых» озерах. Если предположить, что глубина озера была бы не менее 5 м, а тенденция к постоянству температуры сохранялась, то температура придонной воды в таком озере была бы на $+3,5$ °C выше, чем температура придонных вод в озере 3. Из всех десяти исследованных нами озер, озеро 1 характеризовалось минимальным значением рН, и видовым разнообразием фитопланктона в этом

Температура поверхности воды в озере 1 ниже, чем в озере 3, соответственно, $+17,8$ °C и $+19,2$ °C. При этом, в озере 3 температура воды от поверхности до глубины 2 м остается практически постоянной, а затем последовательно уменьшается до уровня дна (5 м), что характерно для большинства крупных озер Б.Соловецкого острова, в которых наблюдается интенсивное ветровое перемешивание вод [27]. В то же время, в озере 1, глубина которого не превышает 3 м, на глубине 1 м наблюдается практически та же температура $+17,6$ °C, что и на поверхности. Затем на глубине 2 м температура воды в этом озере снижается до $+15,4$ °C и слегка возрастает на уровне дна (3 м) до $+15,5$ °C.

Устойчивая термическая стратификация наблюдалась нами ранее в «теплых» озерах Б.Соловецкого озера (температура поверхности ряда озер на Б.Соловецком острове до $+15$ °C выше, чем у остальных озер [27]). «Теплые» озера также как и озеро 1 располагаются в пределах заболоченных территорий. Берега таких озер представляют собой славнину. Но в отличие от озера 1 глубина «теплых» озер достигала 14-17 м,

водоеме (табл.1). Это указывает на более благоприятные условия для жизнедеятельности фитопланктона в озере 1, и в первую очередь, на повышенную среднегодовую температуру в озере 1, по сравнению с другими озерами.

Таблица 1. Показатели обилия фитопланктона в озерах

Название озера	рН	Численность фитопланктона, тыс. кл/л	Концентрация биомассы, мг/л	Видовое разнообразие, энтропия	
				бит/экз	бит/мг
Озеро 1	4,4	2701	3,29	3,27	2,56
Озеро 3	5,7	504	0,69	1,21	0,78

По нашему мнению, это указывает на признаки разгрузки в озеро 1 подземных вод с температурой порядка +15,0 °С. Возможно, что именно вследствие поступления в озеро 1 подземных вод температура его поверхности ниже, чем температура поверхности воды в озере 3. Прозрачность воды последнего выше, т.е. солнечный прогрев должен осуществляться на большую глубину и, следовательно, температура поверхности озера 3 должна быть при прочих равных условиях ниже, чем в озере 1. Кроме того, глубина озера 1 меньше, чем озера 3, а следовательно озеро 1 должно прогреваться солнцем лучше, но этого не наблюдается.

Все вышесказанное позволяет утверждать, что, есть признаки наличия субаквальной разгрузки подземных вод в озеро 1. Подобная разгрузка подземных вод может объяснить опережающий сход ледового покрова в озерах 1 и 2, отмеченный на материалах космической съемки. Если температура вод субаквальной разгрузки остается достаточно постоянной в течение всего года, то в летнее время эти воды должны оказывать охлаждающее воздействие. Зимой же - должны нагревать воду в озерах, особенно ее приповерхностную часть, т.к. из-за ледового покрова ветровое перемешивание зимой отсутствует, а разгружающиеся в озеро воды как более теплые должны всплывать к поверхности. Этот процесс и может инициировать опережающий сход ледового покрова весной.

Наземными режимными наблюдениями на Б. Соловецком острове показано, что в пределах Сосновской аномалии ТП среднесуточная температура почв на несколько градусов выше, чем на остальной территории [31]. Параллельно с этим, был исследован видовой состав растительности Б.Соловецкого острова. Для широты Соловецкого архипелага, расположенного в 150 км от Полярного круга, зональным типом растительности являются характерные для северной тайги *ельники зеленомошные*. Отмечено, что вокруг «теплых» озер наблюдается опережение фенофаз растительности по сравнению с остальными участками островов. В пределах Сосновской аномалии ТП луговая растительность представлена влажно-разнотравными лугами на довольно богатых окультуренных почвах. Покров образуют лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis*), ежа сборная (*Dactylis glomerata*), овсяница луговая (*Festuca pratensis*), опушечно-луговое высокотравье (*Cirsium heterophyllum*, *Filipendula ulmaria*, *Anthriscus sylvestris* и др.), обильно произрастает чина луговая (*Lathyrus pratensis*), клевер луговой (*Trifolium pratensis*), присутствуют манжетки (*Alchemilla sp.*), герань лесная (*Geranium sylvaticum*), душистый колосок (*Anthoxanthum odoratum*). На более бедных влажных лугах господствует луговик дернистый (*Deschampsia caespitosa*). На месте бывших огородов отмечены заросли бутеня ароматного (*Chaerophyllum aromaticum*) и щавеля туполистного (*Rumex obtusifolius*), не встречающихся в таком обилии в других частях Большого Соловецкого острова, а за его пределами не растущими на других островах архипелага.

Обнаружен экземпляр ивы козьей (*Salix caprea*), имеющих диаметр ствола у комля около 1 м, что является достаточной редкостью даже в материковых лесах среднетаежного типа, а на

Соловецком архипелаге подобное развитие древесных представителей умеренной флоры является индикатором повышенной энергообеспеченности почвы.

Развитие неморальной растительности указывает на более высокую энергообеспеченность экосистем в пределах Сосновской аномалии ТП.

Как было показано выше, такой причиной является повышенный вклад эндогенного тепла Земли в энергетический баланс экосистем. Вклад эндогенной составляющей – ТП в энергетический баланс экосистем составляет около 25 Вт/м^2 (см. рис. 2), что повышает энергообеспеченность почвы. Значимость такого эндогенного подогрева для формирования экосистем показывает сравнение сумм прямой солнечной радиации на Большом Соловецком острове и в Ленинградской области, поступающей на дневную поверхность за вегетационный период (период положительных температур воздуха) и иллюстрируется табл. 2.

Анализ табл. 2 показывает, что при более коротком вегетационном периоде эндогенный подогрев на Большом Соловецком острове создает энергообеспеченность экосистем близкую к таковой для Ленинградской области, расположенной в ~550 км к югу от Б.Соловецкого острова. Дополнительный эндогенный подогрев составляет более 10 % от сумм падающей коротковолновой солнечной радиации. С учетом альбедо, для поглощенной коротковолновой солнечной радиации, идущей на нагрев поверхности, эта доля превысит 50%. Это и объясняет развитие неморальной растительности на Б. Соловецком острове.

Таким образом, исследования, выполненные на территории Б.Соловецкого острова показали, что в пределах Сосновской аномалии ТП выявленной с помощью ДГМ наблюдаются природные явления, указывающие на наличие значительного конвективного выноса эндогенного тепла, достигающего десятков Вт/м^2 .

Эти результаты еще раз подтвердили, выдвинутую ранее гипотезу [17] о том, что теплоотдача Земли недооценена из-за недостаточного учета диссипации внутренней энергии нашей планеты за счет тепло-массопереноса.

Таблица 2. Энергообеспеченность экосистем Б. Соловецкого острова и Ленинградской области

Приходная составляющая теплового баланса, Вт/м^2	Вегетационный период							
	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Всего, МДж/м^2
Ленинградская область								
Падающая/Поглощенная среднесуточная коротковолновая солнечная радиация, Альбедо = 0.2	154/31	221/44	233/47	223/45	171/34	96/19	49/10	2970/594
Б. Соловецкий остров								
Падающая/Поглощенная среднесуточная коротковолновая солнечная радиация? Альбедо = 0.2		224/45	255/51	230/46	170/34	96/19		2530/506
Эндогенный подогрев		25	25	25	25	25		320
Суммарная (солнечная и эндогенная)		249	280	255	195	121		2850/826

Литература

1. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
2. Sekioka M. and. Yuhara K. Heat Flux Estimation in Geothermal Areas Based on the Heat Balance of Ground Surface // Journal of Geophysical Research, May 1974. V. 79. No 14. P. 2053-2058.
3. Череменский Г.А. Геотермия. Л.: Недра, 1972. 271 с.
4. Череменский Г.А. Прикладная геотермия. Л.: Недра, 1977. 224 с.
5. Гогель Ж. Геотермия. М.: Мир, 1978. 171 с.
6. Pollack H.N., Hurter S.J., and Johnston R. Heat loss from the earth's interior: analysis of the global data set. Rev. Geophys., 1993, No 31. P. 267-280.
7. Шилин Б.В., Горный В.И., Кариженский В.Е. О регистрации геотермальных потоков тепловой аэросъемкой // ДАН СССР, 1980. Т.252. С. 321-323.
8. Tronin A.A. Satellite thermal survey – a new tool for study of seismoactive regions // Int. J. Remote Sensing, 1996. Vol. 17. No 8. P.1439-1455.
9. Горный В.И. Характеристика распределения температуры земной поверхности на Южном Урале. Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс) // Тверь: ГЕРС, 2001. 286 с.
10. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Гильберштейн П.Г., Каплан С.А. Модель мантийно-литосферного взаимодействия по данным комплексирования на геотраверсе Уралсейс сейсморазведки и дистанционного геотермического метода. Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс) // Тверь: ГЕРС, 2001. 286 с.
11. Горный В.И. Геодинамика Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ (по данным дистанционного геотермического метода) // Региональная геология и металлогения, 2000, № 12. С.76-86.
12. Вилор Н.В., Минько Н.П. Спутниковый мониторинг инфракрасного излучения геолого-структурных элементов Саяно-Байкало-Патомской горной области и Байкальской рифтовой зоны // Исследование Земли из космоса, 2002, №4. С. 55-61.
13. Clauser C., Griesshaber E., and Neugebauer H.J. Decoupled Thermal and Helium Anomalies – Implications for the Transport Regime in Continental Rift Zones // JGR, Solid Earth, November 2002, 107(B11), 2269, doi:10.1029/2001JB000675. P.ETG 1- ETG16.
14. Clauser C., and Villinger H. Analysis of conductive and convective transfer in a sedimentary basin, demonstrated for the Rheingraben // Geophys.J. Int., 1990. Vol. 100. P. 393-414.
15. Лялько В.И., Митник М.М. Исследование процессов переноса тепла и вещества в земной коре // Киев: «Наукова Думка», 1978. - 149 с.
16. Аэрокосмические методы в геоэкологии / Под редакцией В.И. Лялько. Киев: «Наукова думка», 1992. 205 с.
17. Gorny V.I. Convective Heat Flow of European Russia According the Remote Geothermal Method // Proceedings of the International Conference "The Earth's Thermal Field and Relative Research Methods". May 19-21, 1998, Moscow, Russia. P.107-109.
18. Gorny V.I., Kritzuk S.G., Latypov, I.Sh., and Tronin A.A. Geothermal zoning of European Russia on the base of satellite infra-red thermal survey // Proc. of the 30-th Int. Geological Congress, Beijing, China, 4-14 Aug 1996, v.10 - New Technology for Geosciences, VSP, Utrecht, The Netherlands, 1997. P. 63-80.
19. Gorny V.I., Kritzuk S.G., Latypov I.Sh., and Tronin A.A. Terrestrial Heat Flux Measuring and Geothermal Zoning for Regional and Petroleum Geology on the Base of Satellite IR-Thermal Survey // Proc. of the Eleventh Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 27-29 February 1996, Las Vegas Nevada, USA. Vol. 1. P. 594-605.
20. Simakin, A. Ghassemi A. Salt loaded heat pipes: steady-state operation and related heat and mass transport // Earth and Planetary Science Letters, 2003. Vol. 215. P. 411-424.
21. Никшич И.И. Копетдагская линия термальных вод // Вестник ирригации, 1925. № 7. С. 65-82.
22. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Акад. Изд-во «Гео», 2007. 222 с.
23. Юдаев Б.В. Теплопередача. М.: Высшая школа, 1973. 359 с.

24. Горный В.И. Космические измерительные методы инфра-красного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО "Полиграф сервис", 2004. С.10-16.

25. Горный В.И. Дистанционный геотермический метод и оценка энергообеспеченности экосистем. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / Под ред. Ю.Г.Шварцмана, И.Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.

26. Горный В.И. Распределение конвективного теплового потока в Беломорском регионе по данным дистанционного геотермического метода. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / Под ред. Ю.Г. Шварцмана, И.Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.

27. Горный В.И. Термический режим озер. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / Под ред. Ю.Г. Шварцмана, И.Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.

28. Нагорнов О.В., Сергиенко О.В. Отклик нижней поверхности шельфового ледника на изменение температуры морской воды // Математическое моделирование, 2002. Т.14. №6. С. 43-50.

29. White D. E. Rapid heat-flow surveying of geothermal areas, utilizing individual snowfalls as calorimeters // Journal of Geophysical Research, 1969. Vol. 74. No. 22. P. 5191-5201.

30. Dawson G.B. The nature and assessment of heat flow from hydrothermal areas // N.Z.J. Geol.Geophys., 1964. No 7(1). P. 155.

31. Болотов И.Н., Водовозова Т.Е., Тищенко И.В. Климат и микроклимат. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / Под ред. Ю.Г. Шварцмана, И.Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.

Verification of Remote Geothermal Method Results at the Big Solovetskii Island while Investigation of Reasons of Extrazonal Ecosystem Formation

V.I. Gornyy, I.S. Latypov, T.E. Teplyakova, E.Y. Voyakina

*Scientific Research Center for Ecological Safety RAS
18, Korpusnaya Str., Saint-Petersburg, 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@ecosafety-spb.ru*

The remote geothermal method application (based on a multiple NOAA(AVHRR) satellite survey) on the North Karelia, the White Sea, the Kola Peninsula, and the Northern part of Archangelsk Oblast' territory revealed few intensive (up to 25 W/m^2) local anomalies of convective heat flow. One of them is Sosnovskaya Thermal anomaly located at the Northern part of Big Solovetskii Island. Terrestrial heat flow inside that anomaly composes the significant part of the positive part of a surface energy budget. It was suggested that it should cause the specific thermophilic vegetation at the Island. The tectonic interpretation of Landsat ETM+ images was carried out to verify this hypothesis. As the result, the conclusion that the Island was formed as volcano-plutonic structure is done. The analysis of lake surface temperature (according day time Landsat ETM+ data) revealed few lakes with high surface temperature. Long time ground truth activity, including temperature measurements of lake water, a water sampling for chemical and phytoplankton analysis, the botanical investigations provided possibility to explain the thermophilic vegetation of the Island by an additional endogenic heat discharge.

Keywords: heat flow, thermal survey, thermophilic vegetation, Big Solovetskii Island, tectonics, heat&mass transfer.