

УДК 551.248.2: 470.62 / .67

**В.А. Зайцев<sup>1</sup>, Л.В. Панина<sup>2</sup>****НЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА СКИФСКОЙ ПЛИТЫ**

Структурно-геоморфологический анализ и тектонофизическое моделирование позволили выявить геодинамически активную область фундамента, охватывающую Ростовский выступ, северную часть Ставропольского свода, Прикумско-Тюленевский вал, восточную часть кряжа Карпинского и Астраханский выступ. К этой области приурочены максимумы плотностей линейментов, повышенные значения теплового потока, эпицентры землетрясений, месторождения углеводородов. Направления осей деформаций Скифской плиты и орогена Большого Кавказа коррелируют с новейшим структурным планом Скифской плиты.

*Ключевые слова:* геодинамика, неотектоника, структурно-геоморфологический анализ, тектонофизическое моделирование, деформация, линеймент, разрыв.

The use of structure-geomorphological and tectonophysical modeling methods allowed to reveal active geodynamic basement zone including the Rostov scarp, the Northern part of the Stavropol arch, the Pricum-Tulenev swell, the eastern part of the Karpinsky ridge and the Astrahan scarp. Lineaments maximum, an elevated thermal stream, seismicity and hydrocarbon deposits are located there. Strain axis of the Sciphean plate and the Bolshoy Caucasus orogen are in accord with present-day structures of the Sciphean plate.

*Key words:* Geodynamics, neotectonics, structure-geomorphological analysis, tectophysical modeling, deformation, lineament, fault.

**Введение.** Скифская эпипалеозойская плита с севера обрамляет горное сооружение Большого Кавказа. На западе район исследования ограничен центральной частью акватории Азовского моря, на востоке — северо-западным побережьем Каспийского моря. На севере граница совпадает с верховьями р. Калитва, долиной р. Чир, северным окончанием Цимлянского водохранилища, на северо-востоке доходит до нижнего течения Волги. Южным ограничением служит северный склон орогена Большого Кавказа (рисунок).

Вопросы, касающиеся неотектоники Скифской плиты и ее развития начиная с позднего миоцена, подробно рассмотрены ранее [Панина, Костенко 2005; Панина, 2009]. Эта статья посвящена вопросам современной геодинамики Скифской плиты и корреляции деформаций фундамента с новейшей структурой.

**Методика исследований.** Для оценки современной геодинамической активности необходим анализ геолого-геофизических материалов, включающих данные о строении палеозойского фундамента Скифской плиты и новейших структур, а также о тенденциях их развития на современном этапе. В основу изучения новейших деформаций положен структурно-геоморфологический анализ рельефа, предполагающий комплексное дешифрирование разномасштабных (от 1:1 000 000 до 1:200 000) топографических карт и космических снимков с применением компьютерных технологий. Амплитуды

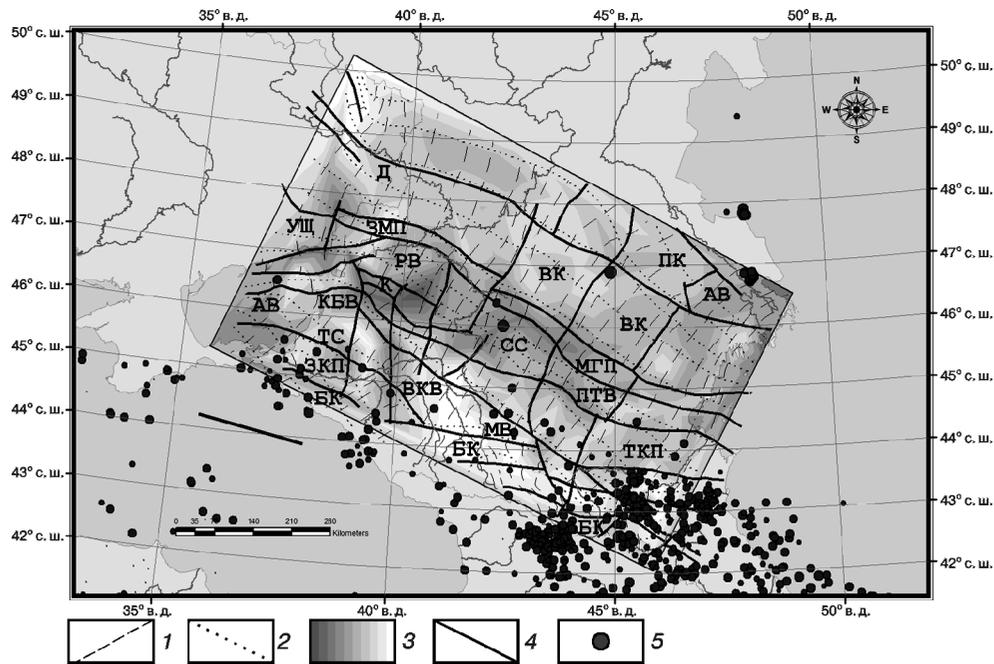
наибольших тектонических движений рассчитывали по методике back-stripping. Привлечены результаты измерения новейших и современных тектонических движений; каталоги землетрясений, карта теплового потока. Сопоставление этих материалов позволило выявить наиболее деформированные и геодинамически активные области.

Эффективный инструмент, позволяющий изучать тектонические процессы, которые реализуются через иерархическую систему полей напряжений и деформаций, воздействующих на неоднородную, структурированную среду, — тектонофизическое, точнее аналоговое моделирование. В его основу положена структурно-геологическая модель, последняя деформируется в соответствии с существующими геодинамическими обстановками и условиями различного нагружения. В нашем случае такой моделью служит палеозойский фундамент Скифской плиты, испытывающий на современном этапе субмеридиональное сжатие со стороны растущего орогена Большого Кавказа.

Выявленные таким образом зоны структурно-геологических концентраторов деформаций — это области новейшей геодинамической активности района, где и локализованы развивающиеся новейшие структуры Скифской плиты, что сопровождается проявлением сейсмичности, повышенным тепловым потоком, образованием разрывов и трещин, приуроченностью газовых и нефтяных месторождений. Работы выполнены с применением компьютерных

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, вед. науч. с., e-mail: v.zaitsev@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, доцент, e-mail: panina53@mail.ru



Карта деформаций фундамента Скифской плиты: оси деформации: 1 — сжатия, 2 — растяжения; 3 — величины деформаций; 4 — разломы; 5 — эпицентры землетрясений.

Структуры фундамента: *прогибы*: ЗКП — Западно-Кубанский, ЗМП — Западно-Маньчский, МГП — Маньч-Гудиловский, ТКП — Терско-Каспийский; *впадины*: ВКВ — Восточно-Кубанская, ПК — Прикаспийская, К — Копанская; *выступы*: РВ — Ростовский, АВ — Астраханский, МВ — Минераловодский; *валы*: ВК — Карпинского, КБВ — Каневско-Березанский, ПТВ — Прикумско-Тюленевский; СВ — Ставропольский свод; ТС — Тимашевская ступень; УЩ — Украинский щит; Д — Донбасс; БК — ороген Большого Кавказа

технологий на базе геоинформационной системы ArcMap.

**Структурный план палеозойского фундамента Скифской плиты.** В фундаменте Скифской плиты по данным бурения и геофизическим исследованиям выявлены структуры первого ранга: прогибы, впадины, валы, выступы, ограниченные зонами субширотных и субмеридиональных глубинных разломов. Эти разломы обусловили субширотную и субмеридиональную зональность, характерную и для новейшего структурного плана. С запада на восток в фундаменте Скифской плиты выделяются западный, центральный и восточный сегменты.

**Западный сегмент.** На юге в изогипсах фундамента выделяется Западно-Кубанский прогиб, граничащий с горным сооружением Большого Кавказа по зоне глубинного Ахтырского разлома [Шемпелев и др., 2003]. Восточнее расположена Восточно-Кубанская впадина. На севере по зоне Новогитаровского разлома Западно-Кубанский прогиб граничит с Тимашевской ступенью. Протяженная зона Бейсугского разлома отделяет Тимашевскую ступень от расположенного севернее Каневско-Березанского вала, продолжением которого в области акватории Азовского моря служит Азовский вал. Расположенная севернее Копанская впадина отделена от Ростовского выступа Ейским разломом. Западно-Маньчская впадина, ограниченная на юге и на севере также зонами глубинных разломов, обрамляет с севера Ростовский выступ. Зоны глубинных разломов, разделяющие крупные структуры фундамента, уходят глубоко в земную кору

и мантию [Волож, 1999; Шемпелев и др., 2003]. На севере расположено западное окончание вала Карпинского, продолжением которого является Донбасс (рисунок). Отметим, что описанные зоны разломов, разделяющие структуры фундамента, по геофизическим данным прослеживаются глубоко в земную кору и мантию [Волож, 1999; Шемпелев и др., 2003].

**Центральный сегмент.** С юга на север следуют Минераловодский выступ, Ставропольский свод, Маньч-Гудиловский прогиб, вал Карпинского, граничащий на северо-востоке с Прикаспийской впадиной. Все структуры разделены между собой глубинными разломами.

**Восточный сегмент.** На востоке самый южный структурный элемент Скифской плиты — обширный Терско-Каспийский прогиб, который граничит с горно-складчатым сооружением Большого Кавказа по Владикавказской зоне разломов. К северу расположен Прикумско-Тюленевский вал, отделенный с юга зоной разломов и продолжающейся на восток в акваторию Каспийского моря. На севере, последовательно сменяясь, прослеживаются Маньч-Гудиловский прогиб, вал Карпинского и Прикаспийская впадина, осложненная на востоке Астраханским выступом. Границами их также служат протяженные глубинные разломы, среди них Южно-Маньчский, который прослеживается до поверхности Мохоровичича [Волож, 1999].

Помимо субширотных нарушений фундамент Скифской плиты рассечен и субмеридиональными разломами. На западе района к субмеридиональным

относится разлом, следующий параллельно р. Пших на юге и продолжающийся далеко на север вплоть до широтного течения р. Ея. Параллельно ему выявлены разломы, простирающиеся примерно вдоль меридиональных участков долины р. Егорлык. Наиболее протяженным является разлом, зарождающийся на юге Ставропольского поднятия, простирающийся севернее параллельно долине р. Калаус и уходящий далеко на северо-северо-восток вплоть до Сарпинских озер. Параллельно ему выделяется серия разломов северо-восточного простираения, зарождающаяся в верховьях р. Урух и уходящая на северо-восток параллельно побережью Каспийского моря. Выявлен разлом в междуречье Аргуна и Сунжи в области Терско-Каспийского прогиба (рисунок). Сочетание субширотных и субмеридиональных разломов создает разрывно-блоковую структуру фундамента Скифской плиты.

**Тектонофизическое моделирование.** Описанный разрывно-блоковый структурный план фундамента Скифской плиты взят за основу при проведении серии экспериментов по тектонофизическому и компьютерному моделированию. Тектонофизическое моделирование предполагает использование эквивалентных материалов со структурой, близкой или аналогичной природному объекту. При этом характер и способ нагружения моделей должны быть схожи с природными. Проведенное моделирование носит скорее качественный характер, так как не воспроизводит все условия физического подобия реологических свойств, времени и скорости деформаций, тем не менее полученные результаты позволяют судить о кинематике смещений в моделях с исходной структурой и заданным способом внешнего нагружения. Это позволяет изучать влияние систем ранее сформированных неоднородностей (зоны разрывов и трещиноватости) в массиве пород на объемно-плотностное состояние (уплотнение—разуплотнение) вновь деформируемой среды и характер блоковых движений в сопоставлении с аналогичными природными ситуациями.

В качестве модельного материала использована глина, которая представляла материал условного фундамента, нарезанного изначально на блоки, конфигурация, размеры и общая картина соотношения которых между собой в целом соответствовали структуре фундамента Скифской плиты. Размеры модели из глины составляли  $20 \times 32 \times 4$  см. Сжатие было встречное, двухстороннее, в направлении северо-северо-восток—юго-юго-запад (поперечное к простираению Кавказа). Максимальное сокращение модели достигало 15% от первоначального поперечного размера.

При моделировании использовали маркеры в виде кругов сантиметрового диаметра, их наносили на границы блоков «фундамента» и на межблоковые узлы либо равномерно по поверхности. По их смещениям или по изменению исходной формы оценивали кинематику перемещений, величину и

ориентировку главных осей деформации в разных частях модели. Процесс деформации и его результаты поэтапно фиксировались цифровой фотокамерой и в дальнейшем обрабатывали с помощью редактора компьютерной графики и в геоинформационной системе ArcMap.

**Результаты моделирования и их сопоставление с новейшим структурным планом.** В результате моделирования в исходной разрывно-блоковой структуре активизировались направления, по которым прошли сдвиговые смещения разных амплитуды и знака. Амплитуда смещений составляла несколько миллиметров и изменялась на небольшом расстоянии — от 0,5 до 4 мм. Наряду с участками разломов, где по ним наблюдались движения, обнаружены направления и зоны, находившиеся в компрессионном состоянии без существенных перемещений. Установлены и так называемые закрытые для деформации участки, где не произошло заметное изменение формы исходно круглого маркера. Изменение ориентировок осей эллипсоида деформации указывает на вращение блоков против или по часовой стрелке в зависимости от их формы, положения в общей структуре и простираения их внешних границ, находившихся в различных условиях нагружения. Это свидетельствует о дифференцированном характере движения блоков и неоднородности проявления активизации среды при внешнем нагружении объема. При этом можно выделить динамически активные направления и узлы в разрывно-блоковой структуре и зоны, почти не затронутые деформацией, а также участки, находящиеся в компрессионном состоянии, и зоны явного растяжения или декомпрессии.

Таким образом, моделирование позволило выявить подвижки по зонам разломов фундамента, ограничивающим крупные блоки, как правило, со сдвиговым компонентом. При этом значения амплитуды и направление движений вдоль разломов изменяются, затухая на отдельных участках. В целом северо-северо-западные разломы имеют правосдвиговую составляющую, северо-северо-восточные — левосдвиговую, в субкавказских зонах разломов сдвиговая составляющая выражена хуже. Определение осей напряжений показало, что оси сжатия имеют субмеридиональное направление, а растяжения — субширотное. Вместе с тем траектории осей изменяют направление, особенно на западе и востоке района, повторяя конфигурацию Кавказского орогена. Это обстоятельство может указывать на то, что Скифская плита и ороген Большого Кавказа находятся в едином поле напряжений.

Сравнение новейшего структурного плана и фундамента показало, что новейшие дислокации наследуют главным образом крупные положительные структурные элементы фундамента — своды, валы, выступы фундамента, существенно разросшиеся к современной эпохе, что отражено на карте неотектоники [Панина, 2009]. Вместе с тем существенно

сократились размеры впадин фундамента, и они осложнены частными поднятиями. Наследуются и крупные разломы фундамента: Ахтырский, Владикавказский, Манычский. Большая часть разломов фундамента отражена в новейших структурах лишь на отдельных участках.

Обратим внимание на разные направления и величину деформаций фундамента в различных блоках. Наиболее деформированной оказалась область субкавказского простираения в центральной части Скифской плиты. Она включает Ростовский выступ на западе, северную часть района Ставропольского свода центрального сегмента Скифской плиты, Прикумско-Тюленевский вал, Маныч-Гудиловский прогиб, восточную часть вала Карпинского и Астраханский выступ на юго-востоке Прикаспийской впадины (рисунок).

В новейшем структурном плане этой области на западе соответствуют Крыловское и Батайское поднятия, северная часть Ставропольского, существенно редуцированная к новейшему этапу развития Манычская впадина, юго-восточная часть Сальско-Ергенинского поднятия и юго-восточный сегмент Прикаспийской впадины [Панина, 2009]. На новейшем этапе развития перечисленные поднятия испытывают рост на фоне сокращения площади впадин. Особенно это касается Ставропольского поднятия, размеры которого существенно изменились по сравнению с одноименной структурой фундамента вследствие разрастания его в северном, северо-западном и восточном направлениях. В результате произошло практически полное вырождение Маныч-Гудиловского прогиба фундамента, превратившегося на новейшем этапе в узкую впадину-долину.

Косвенным доказательством роста новейших поднятий в геодинамически активной зоне служит нахождение здесь максимальных значений плотности линеаментов разных направлений, дешифрированных на космических снимках. Для количественной оценки распространения линеаментов выполнен статистический анализ, при котором подсчитывалась плотность (густота) линеаментов ( $\text{м}/\text{км}^2$ ). Максимальные значения плотности линеаментов приурочены на западе к Крыловскому, Батайскому и Выселковскому новейшим поднятиям. Повышенными значениями плотности линеаментов характеризуется также северная область Ставропольского, восточная часть Прикумского (Прикумско-Тюленевский вал), а также южный склон Сальско-Ергенинского новейшего поднятия (восточная часть вала Карпинского).

Таким образом, наблюдается хорошая корреляция максимумов плотности линеаментов с растущими новейшими поднятиями, сосредоточенными в геодинамически активной зоне фундамента, выявленной путем тектонофизического моделирования.

Активный рост Ставропольского и Сальско-Ергенинского поднятий подтверждается и повторным нивелированием, проведенным за последние

70–100 лет. Согласно этим данным, названные структуры вовлечены в процесс поднятия со скоростью 2–4 мм/год. В то же время восточные части Терско-Каспийской и Терско-Кумской впадин, а также западная периферия Западно-Кубанской впадины испытывают прогибание со скоростью 2 мм/год. Отметим, что, согласно инструментальным наблюдениям за последнюю четверть XX в., распределение областей поднятий и погружений Скифской плиты в целом отражает тенденцию к усилению роста поднятий и увеличению их размера на фоне сокращения впадин [Лиленберг и др., 1997].

**Сопоставление результатов моделирования с сейсмичностью, тепловым полем и месторождениями углеводородов.** Геодинамическая активность выявленной зоны максимальных деформаций фундамента подчеркнута и приуроченностью эпицентров землетрясений к наиболее протяженным зонам разрывов, нарушающим ее. Среди них протяженная Армавирская зона разрывов, зарождающаяся в области горно-складчатого сооружения Большого Кавказа и субмеридионально пересекающая практически все структуры Скифской плиты до Цимлянского водохранилища. В северной части Ставропольского поднятия на эту зону проецируется эпицентр сейсмического события 1969 г., которое оценивается магнитудой до 9,9. Восточнее к параллельной Калаусской зоне тяготеют землетрясения 1999 и 2006 гг. с магнитудами 4,1 и 4,4 соответственно. Сейсмически активны и зоны разрывов субширотного (западно-северо-западного простираения): Армавири-Невинномысская, Южно-Манычская, Акшибай-Ергенинская. Значения магнитуды здесь изменяются от 3,9 в Терско-Каспийском прогибе и 4,6 на северо-западной периклинали Ставропольского поднятия до 9,9 на восточной границе Сальско-Ергенинского поднятия (рисунок).

Один из показателей геодинамической активности — повышенный тепловой поток. Согласно [Pollack et al., 1991], в центральной части наиболее деформированной зоны фундамента линии теплового потока вытянуты субмеридионально, а их максимальные значения приурочены к Ставропольскому поднятию, центральной части Манычской впадины и югу Сальско-Ергенинского поднятия. По геофизическим данным здесь существует положительная мантийная аномалия, имеющая субмеридиональное простираение и разделяющая Скифскую плиту на западную и восточную области [Егорова, Старостенко, 2006].

К прикладным аспектам использованных методик относится обнаружение взаимосвязей областей геодинамической активности с месторождениями углеводородов. Большинство газовых месторождений приурочено к максимально деформированной зоне фундамента, в то время как нефтяные месторождения тяготеют к менее деформированным и наиболее стабильным в геодинамическом отношении участкам Скифской плиты. Это может указывать на миграцию газа в условиях активизации структур на новейшем

этапе развития. Пути миграции могут служить зоны разрывов и трещиноватости горных пород, которые сопровождают рост поднятий.

**Заключение.** Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что Скифская плита на новейшем этапе развития начиная по крайней мере с позднего миоцена втягивается в процесс поднятия, что ведет к разрастанию поднятий и сокращению размеров впадин (Западно-Кубанская, Восточно-Кубанская, Терско-Каспийская, Манычская и др.). Согласно результатам тектонофизического моделирования, особенно активно этот процесс происходит в центральной зоне Скифской плиты, вытянутой с запада на восток, где рост поднятий сопровождается образованием трещин и разрывов, высокими положительными значениями современных вертикальных движений, проявлением сейсмичности, повышенным тепловым потоком, а также скоплением газовых месторождений.

Крупные структурные элементы фундамента — валы, выступы и др., разделенные зонами разломов, в целом наследуются новейшими структурами. Среди структур фундамента Скифской плиты первого ранга унаследованное развитие испытывают Ставропольское и Сальско-Манычское поднятия, Прикумско-Тюленевский, Каневско-Березовский, Азовский валы, Ростовский выступ. В то же время бескорневые складчато-надвиговые структуры Терско-Каспийского прогиба не находят отражения в деформациях фундамента, здесь по данным моделирования деформации фундамента незначительны.

Некоторые протяженные разломы и главным образом их простирания наследуются на новейшем этапе, среди них субширотные Бейсугский, Ахтыр-

ский, Владикавказский, Южно-Манычский разломы. Также реанимируются фрагменты древних разломов субмеридионального простирания, вдоль которых Скифская плита испытывает блоковые (клавишные) знакопеременные движения начиная по крайней мере со среднего миоцена [Костенко, Панина, 2001]. Например, субмеридиональная Армавирская зона лишь частично (на участке долины р. Егорлык) наследует одноименную зону разрывов фундамента. Многие из разломов прослеживаются в горную часть Кавказа.

Исходя из общей геодинамической ситуации региона субкавказские простирания соответствуют структурам сжатия (взбросы и надвиги), субмеридиональные — отражают обстановку растяжения, и их можно интерпретировать как раздвиги и сбросы. Северо-северо-западные разломы имеют, как правило, праводвиговую составляющую, северо-северо-восточные — леводвиговую, в субкавказских зонах разломов сдвиговая составляющая выражена хуже. Подобное сочетание разрывов Скифской плиты характерно и для орогена Большого Кавказа, для которого в целом установлено субмеридиональное сжатие с изменением направления осей с востока на запад. Согласно данным тектонофизического моделирования, оси траекторий движений вдоль разломов изменяются с востока на запад, повторяя конфигурацию Кавказского орогена, это может указывать, что Скифская плита и ороген Большого Кавказа находятся в едином поле напряжений.

Установленная приуроченность газовых месторождений к выявленной геодинамически активной области Скифской плиты открывает новые перспективы поисков месторождений углеводородов в этом районе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Волож Ю.А.* Строение кряжа Карпинского // Геотектоника. 1999. № 1. С. 28–44.

*Егорова Т.П., Старостенко В.И.* Неоднородность верхней мантии Европы по комплексу геофизических данных // Строение и динамика литосферы Восточной Европы. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006. С. 600–623.

Каталог землетрясений Международного сейсмологического центра 1964–2008. URL: [http://zeus.wdcb.ru/sep/hp/seismology.ru/hypocenter\\_data\\_ru.shtml/](http://zeus.wdcb.ru/sep/hp/seismology.ru/hypocenter_data_ru.shtml/) (дата обращения: 10.08.2009).

*Костенко Н.П., Панина Л.В.* Позднеорогенная структура Предкавказья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2001. № 1. С. 11–20.

*Лиценберг Д.А., Кафтан В.И., Кузнецов Ю.Г., Серебрякова Л.И.* Картографические модели вариаций современных тектонических движений морфоструктур Кавказа и Закавказья для разных эпох // Геоморфология. 1997. № 4. С. 63–75.

*Панина Л.В.* Новейший структурный рисунок Скифской плиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 1. С. 23–31.

*Панина Л.В., Костенко Н.П.* Новейшие деформации на востоке Скифской плиты // Там же. 2005. № 3. С. 5–12.

*Шемпелев А.Г., Швец А.И., Золотов Е.Е., Фельдман И.С.* Геолого-геофизический разрез вдоль Кубанского профиля // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы: Мат-лы XXXVI Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2003. С. 301–305.

*Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R.* The New Global Heat Flow Compilation. Department of Geological Sciences. Michigan: University of Michigan, 1991. March. URL: [http://www.wdcb.ru/sep/heat\\_flow/hf\\_cat\\_gl.ru.html](http://www.wdcb.ru/sep/heat_flow/hf_cat_gl.ru.html) (дата обращения: 10.08.2009).

Поступила в редакцию  
11.05.2010