

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ, МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

УДК 551.243/1251

О.І. Лукієнко, д-р геол.-мінералог. наук

СИНЕРГЕТИКА ТЕКТОНІЧНОЇ ТЕЧІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД У ЗОНАХ РОЗЛОМІВ

Розглянуто тектонічну течію гірських порід у зонах розломів як самоорганізуючий процес, що керується законами синергетики. Визначено основні риси цього процесу. Відзначено енергетичні фактори й механізми його здійснення.

Tectonic flow of rocks in break zones is considered as self-organizing process which is guided by the synergetic laws. The basic features of this process are determined. The power factors and mechanisms of this process are determined.

Постановка проблеми та завдання. Тектонічна течія є однією із найважливіших форм здійснення структуризації (структурна перебудова) земної кори. Під нею розуміється безперервна деформація, що розвивається в часі під дією напруженого стану і призводить до створення залишкових структурних форм. У зонах розломів вона реалізується як зсувна деформація (односистемна зсувна течія за Є.І. Паталахою [15]), у сферу прояву якої залучаються крайові частини блоків земної кори при зміщенні по розломах. Така течія здійснюється як певні форми руху твердої речовини на зерновому та міжзерновому рівні в супроводі структурної та в ряді випадків і речовинної перебудови відповідного цим зонам середовища. Природа, фактори та механізми такої течії є однією з найважливіших проблем тектоніки. Для їх вирішення використовуються методи структурної геології та петрології, петро- та тектонофізики, фізики твердого тіла, механіки суцільних середовищ і навіть гідродинаміки. Кожний, безсумнівно, допомагає у вирішенні тих чи інших сторін цієї проблеми, але все ж таки не дає необхідної відповіді на питання: якими фундаментальними законами керується подібна течія, яку вона має направленість, яким чином здійснюється структуризація середовищ при її реалізації, як взаємодіють між собою при її здійсненні всі елементи системи та багато інших.

Шукаючи відповіді на ці питання, перш за все, треба виходити із тієї реальності, що у сферу тектонічної течії в природних умовах потрапляють не окремі геологічні тіла, а речовинно та структурно неоднорідні геологічні середовища. При цьому подібна неоднорідність проявляється на всіх масштабних рівнях цих середовищ. Зокрема, останні на мікрорівні майже завжди зернисті й у більшості випадків полімінеральні, й відповідно мікронеоднорідні в густинному та в'язкісному відношенні. На мезорівні подібні середовища також відзначаються мініливістю літолого-петрографічного складу і відповідною варіацією густини, в'язкості, пористості, теплопровідності та інших фізичних властивостей. Крім того, вони практично завжди володіють великою кількістю орієнтованих або, навпаки, різноорієнтованих, потенційних для наступного використання, накладеними деформаціями поверхонь із ослабленими зв'язками між зернами та мезотілами (відображаються в різноманітних мікро- та мезотекстурах порід, шаруватості осадових тіл і смугастості магматичних та інших тіл, тріщинній прототектоніці вулканічних і інтрузивних тіл тощо). Крім усього іншого, такі середовища при деформації відкриті для регіональних і локальних силових полів і теплових потоків.

Відзначені неоднорідності геологічних середовищ безсумнівно впливають на характер реалізації тектонічної течії гірських порід. Зокрема, є всі підстави вважати, що їх наявність викликає диференціацію, перерозподіл макрополів напружень на мезо- та мікроскладові й від-

повідним чином впливає на характер розподілу деформації за досягненням межі текучості, міцності, а також за орієнтацією породжених цією деформацією лінійних і площинних мікро- та мезоструктурних форм [9, 13, 14, 15, 17]. Більше того, досвід вивчення дислокаційних утворень, породжених тектонічною течією [9, 15, 18], свідчать, що загальною тенденцією подібного процесу є створення такої структурної організації середовища, яка спроможна нейтралізувати девіаторні (диференційовані) напруження й тим самим зменшити опір зсувної деформації та забезпечити її реалізацію з відносно мінімальними енергетичними витратами. Однією з найдосконаліших форм такої структуризації є *лінеаризація* середовищ [15, 17], яка являє собою зміну нелінійних параметрів течії лінійними і, як наслідок цього, утворення односистемної (взаємно паралельної) орієнтації всіх, що виникають при подібній течії, площинних і лінійних структурних форм (кльважних, спланцюватих тощо) та геометричних елементів структур (осьових поверхонь і шарнірів складок, лінійності тощо), а також великих площин і довгих осей усіх деформованих первинних і вторинних, новоутворених при деформації тіл. Формування переважної орієнтації даного типу, тобто структурної анізотропії в загальному розумінні, при течії зумовлюється дією широкого набору механізмів, серед яких, залежно від реологічних властивостей середовищ і характеру й масштабів енергетичних витрат, суттєву роль відіграють глибоке механічне руйнування, односистемне крихке та в'язке кльважування, розспанцювання та розгнейсування, мінеральна та гранулометрична диференціація породи, тектонічне розлізнування, а також складкоутворення та ізокліналізація складчастих форм.

Структурна перебудова середовищ відзначеного типу в зонах зсувної течії має незворотний, направлений характер, узгоджений з термальними умовами та характером розподілу механічних навантажень, а також з деформаційними властивостями порід. Вона здійснюється через проходження цілого ряду дислокаційних перетворень середовищ і проміжних станів організації (структурні флуктуації) системи, яке в сучасному розумінні подібних природних явищ відповідає *самоорганізуючим системам*.

Стан проблеми та основні положення синергетики. Дослідження самоорганізуючих систем є предметом *синергетики* [22] або *термодинаміки незворотних процесів* чи *термодинаміки нерівноважних, дисипативних систем* [4, 20]. Синергетика виступає як теорія еволюції та самоорганізації складних частин світу. Її основні положення викладені в ряді узагальнюючих робіт [1, 2, 5, 7, 8].

Основною властивістю подібних систем є їх *енергетична відкритість (дисипативність)* і спроможність до якісно-кількісної перебудови при порушенні одного чи більше їх параметрів. Подібні системи належать до

нелінійних, флуктуаційних, що постійно втрачають стійкість і відзначаються спонтанними переходами від найпростішого хаотичного "броунівського" руху до більш системного, ламінарного.

На сьогодні виявлено достатня кількість природних і експериментальних самоорганізуючих систем у біологічних і хімічних середовищах [6], газах та рідинах, а також у твердих тілах і матеріалах (металах, сплавах, полімерах, льодових покривах). Синергетичні підходи все більше впроваджуються у геологічну науку й у тому числі у геотектоніку (нелінійна геодинаміка Ю.М. Пушаровського [12, 21]). Але при цьому треба зазначити, що вони ще досить обмежено використовуються при вивченні дислокаційних процесів [11, 16], або питання синергетики у відношенні до цих процесів ставляться лише як проблемні [3, 9, 12, 13, 19]. Подібна ситуація, можливо, зумовлена недостатньо комплексними підходами до оцінки природи та механізмів подібних процесів.

Термін "синергетика" походить від грецького *synergeia* – сприяння, співробітництво. Синергізм означає спільне функціонування органів і систем. У широке вживання цей термін увів на початку 70-х років німецький фізик-лазерщик Генріх Хакен [22] для позначення нового наукового напрямку – теорії виникнення нових якостей у складних системах, якими не володіють ні одна із частин цих систем (дослівно – теорії самоорганізації, саморозвитку, самовизначення систем). Синергетика спирається на такі фундаментальні властивості систем, як *нелінійність, когерентність, відкритість, дисипативність*.

До *нелінійних* належать ті системи, розвиток яких відзначається *неоднозначністю, нестійкістю, незворотністю*. Під нелінійністю, звичайно, розуміється порушення одномірної упорядкованості та відсутність прямих (пропорційних) залежностей між основними параметрами системи. В алгебраїчному виразі така властивість систем характеризується диференціальними, інтегральними, функціональними рівняннями, які містять невідомі величини не тільки в першому ступені. Так, наочною моделлю багатьох характерних особливостей синергетики служить рівняння теплопровідності з нелінійним джерелом і коефіцієнтом [8]:

$$+T_t = [k(T) T_x] x + Q(T),$$

$$k(T) = k_0 T^a$$

$$Q(T) = q_0 T^b$$

Відкритість і дисипативність системи проявляється в тому, що вона обов'язково обмінюється енергією з іншими системами. Її розвиток переважно відбувається при живленні енергією зі сторонніх джерел, тобто при взаємодії із зовнішнім (для даної системи) середовищем.

Когерентність (від лат. *cohaerentia* – внутрішній зв'язок, взаємна зв'язаність) у синергетиці означає узгодженість взаємодії елементів у масштабах усієї системи. За такої узгодженості здійснюється зв'язок структурних рівнів різного масштабу. Зміни одночасно відбуваються на всіх рівнях. При цьому діє принцип Ешбі: за мінімальних енергетичних витрат перебудова системи здійснюється переважно на макрорівні шляхом локалізації процесів лише на окремих ділянках відповідного цій системі фазового простору, тоді як за подальшого зростання енергетичних витрат перебудова системи переходить на мезо-, а потім і мікрорівень, поступово охоплюючи систему в цілому.

Незворотність процесів. У самоорганізуючих системах структурна перебудова середовищ при зниженні енергетичних витрат (при досягненні стану відносного спокою) не відновлюється або взагалі консервується. При подальшому, але безперервному зростанні енергетичних витрат система удосконалюється, тоді як при

поновленні таких витрат після певної паузи система починає свій розвиток з певного нуля.

Важливу роль при самоорганізації відіграють *біфуркація та динамічний (детермінований) хаос*, а також наявність *атракторів*.

Біфуркація (від лат. *bifurcus* – роздвоєння) забезпечує перехід від одного стану системи в інший. Такий перехід здійснюється в *точках біфуркації*, де шлях еволюції відкритої нелінійної системи розгалужується. У таких точках траєкторії руху елементів системи різко гілкуються, породжуючи своєрідний хаос. При цьому вибір гілки визначається лише спектром можливостей системи в даних умовах і залежить від флуктуації (пульсуючих змін станів і параметрів системи) та від факторів локального масштабу.

Найпростішим прикладом біфуркації є вигин шару (рис. 1). Якщо плоске тіло, яким є шар, поступово стискувати з двох боків у напрямі паралельно його осі, то на початку деформація має пружний характер і вона лінійна, тобто тіло зберігає плоску форму. При подальшому збільшенні навантаження тіло на певному етапі зазнає вигин наліво чи направо (у природних умовах у бік найменшого тиску, тобто доверху). Система виявилася вимушеною при значенні лінійного параметра λ_0 здійснити катастрофічний стрибок. Це значення параметру і називається *точкою біфуркації*. Праворуч цієї точки суцільній лінії на графіку відповідає стійкий стан, пунктирній лінії – нестійкий її стан. Гілкою позначено місце на графіку, в якому лежить певне стійке рішення системи.

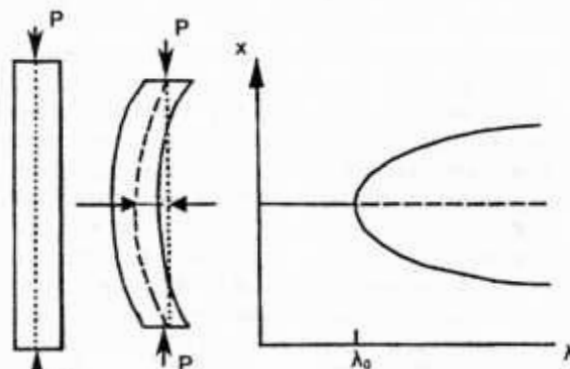


Рис. 1. Біфуркаційна діаграма вигину шару. Побудована за мотивами схеми вигину балки [16]

Подібних стрибків і відповідних проходжень через точки біфуркації може бути значно більше. Зокрема, на наступному етапі тіло може зазнати втрату суцільності по сколу, відриву, а потім взагалі почне спонтанно руйнуватися.

Динамічний (детермінований) хаос є носієм цілісної ієрархії при самоорганізації. Прикладом подібного хаосу є турбулентний рух речовини у вогняному полум'ї або стовпі диму, турбулентна течія рідин тощо. Однак, під таким хаосом розуміються не безструктурні, випадкові процеси, а налагодження складних когерентних, дисипативних (розсіяних) структур, які відображають взаємодію системи з навколишнім середовищем. Хаос необхідний для виходу системи на один з відносно стабільних станів. Він спочатку забезпечує можливість сходження з попередньої траєкторії при втраті стійкості в зоні кризи (точці біфуркації), а потім допомагає підключитися до нового такого стану, долаючи перешкоди на цьому шляху. При цьому кожне наступне проходження відзначених процесів через точку біфуркації формує кінематичну траєкторію, що наближається до ідеальної. Іншими словами, кожен раз на вибір механі-

змів і спосіб здійснення течії буде впливати *атрактор* (англ. *приваблювач*) – область притягання, якій відповідає той відносно стабільний стан, що якби притягує до себе множини можливих траєкторій руху системи, які задаються різними початковими умовами. Через малі блукання система потрапляє в атрактор одної, відносно найменш енергоємної, узгодженої із законами динаміки, траєкторії. Математичним виразом подібної еволюції дисипативних систем є *фазовий портрет* – сукупність фазових траєкторій системи, що відповідає певному набору початкових умов.

Використання синергетичних підходів для вирішення задач тектонічної течії як самоорганізуючого процесу. Тектонічна течія в зонах розломів за характером деформаційної поведінки порід, прояву її на всіх масштабних рівнях, направленості розвитку певною мірою також задовольняє відзначені умови синергетики і являє собою самоорганізуючий процес. Зокрема, відповідні їй системи так само *нелінійні* (нерівноважні) і так само *когерентні* й *відкриті* та *дисипативні*, а структурні зміни середовища, які забезпечують їх функціонування, *незворотні*.

Нелінійність (нерівноважність) цих систем знаходить своє відображення в неоднорідності та нерівномірності розподілу деформації, про яке йшлося на початку даної статті. *Відкритість* та *дисипативність* тектонічної течії (як системи) проявляється в тому, що вона обов'язково обмінюється енергією з іншими системами й при цьому сама живиться *механічною* та *тепловою енергією*, постачальниками яких є більш масштабні тектонічні та теплові системи. Зокрема, джерелом механічної енергії для забезпечення тектонічної течії в зонах розломів служить негідростатичне стиснення або розтяг та зсувні деформації, які ініціюються девіаторними напруженнями. У свою чергу тепловою енергією тектонічна течія забезпечується регіональним тепловим розігрівом земної кори в рамках термального градієнта та локальними тепловими полями, що створюються дією флюїдних потоків та гідротерм, впровадженням магми по розломах тощо. Можливо, частково тепло генерується за рахунок дисипації механічної енергії. *Когерентність* тектонічної течії проявляється в узгодженій взаємодії всіх механізмів, що її забезпечують, на мікро-, мезо- та макрорівні.

Розглянемо особливості синергетичності цих систем більш докладно. Подібний розгляд зручно зробити, використовуючи положення та принципи *тектонофаціального аналізу*. Теоретичні основи цього аналізу викладені в роботі [15]. Відзначимо, що цей аналіз базується на парагенетичній основі та враховує відносні ступені дислокаційних перетворень порід та Р-Т-умови й реологічні властивості середовищ, у яких ці перетворення відбуваються. При цьому відносні ступені дислокаційних перетворень визначаються за *десятибальною шкалою тектонофацій* (своєрідних дислокаційних фацій), у рамках якої тектонофація I (тут і далі римськими цифрами позначені бали тектонофацій) означає мінімальні деформації, а тектонофація X – максимально можливі для тих чи інших фізичних умов деформації. Такі фації утворюють латеральні ряди вхрест простягання розломів і прилягаючих до них ділянок (рис. 2). При цьому зони розломів маркуються рядом тектонофацій V–X–V (цей діапазон, залежно від реологічних умов середовища, розширюється або навпаки звужується) [9, 10, 15]. Крім усього іншого, подібні ряди відображають характер зонального розподілу по латералі механічних навантажень і, відповідно, відносної кількості механічної енергії, що була витрачена на здійснення тектонічної течії. Зокрема, можна вважати, що тектоно-

фація X відповідає тій частині (осьова, шов) зони розлому, яка зазнає відносно максимальних механічних навантажень і відповідних витрат механічної енергії, а тектонофація I відзначається мінімальними, а іноді і нульовими витратами такої енергії.

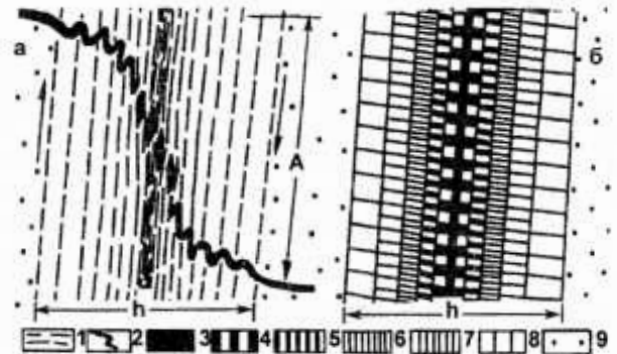


Рис. 2. Структурна (а) та тектонофаціальна (б) схеми типового в'язкого розлому: 1 – кліваж, 2 – умовний шар, на прикладі якого показано характер зім'яття та дезінтеграції шаруватих тіл, а також траєкторію (розподіл амплітуди по латералі та вертикалі) зміщення по зоні розлому, 3–9 – тектонофації за десятибальною шкалою (3 – X, 4 – IX, 5 – VIII, 6 – VII, 7 – VI, 8 – V, 9 – IV–I). А – амплітуда зміщення по розлому, h – потужність зони розлому

Для характеристики фізичних умов (у т. ч. термальних), а також реологічних властивостей середовищ у тектонофаціальному аналізі вживається поняття про *первинну* та *вторинну епізону*, мезозону та *катазону* – як структурно-реологічні обстановки. Епізони при цьому відповідають середовища, у яких тектонічна течія та відповідні їй дислокаційні перетворення відбуваються за температур, що нижче кінематичного порогу метаморфічних реакцій, тобто практично за нульових витрат теплової енергії. При цьому в первинній епізоні такі перетворення здійснюються на фоні літогенезу осадових порід і у зв'язку з цим мають комбінований, крихко-пластичний характер, тоді як у вторинній епізоні у сферу подібних процесів потрапляють дуже в'язкі кристалічні (магматичні, метаморфічні тощо) та інтенсивно діагенезовані осадові породи, які надають відповідним середовищам крихко-пружних властивостей. Мезозона охоплює середовища, Р-Т-умови яких при тектонічній течії відповідають зеленосланцювій та епідот-амфіболітовій фаціям метаморфізму та низько- й середньотемпературному метасоматозу. В межах цієї структурно-реологічної обстановки тектонічна течія здійснюється за допомогою кліважування за участю динамометаморфізму. Катазона, на відміну від двох попередніх структурно-реологічних обстановок, охоплює високотемпературні деформаційні середовища, Р-Т-умови яких при тектонічній течії відповідають амфіболітовій, гранулітовій, роговикувій фаціям та умовам гранітизації.

Вибір *атракторів*, тобто привабливих для систем станів і траєкторій розвитку, при тектонічній течії в зонах розломів відбувається в тісному узгодженні з відзначеними енергетичними можливостями систем, з урахуванням гідростатичного та негідростатичного тиску, а також реологічних властивостей середовищ.

У *первинній епізоні*, яка відзначається майже нульовим рівнем теплової енергії (холодна зона) і в той же час широким діапазоном реологічних властивостей порід (за рахунок їх різної літфікованості), основним і регулюючим фактором течії порід є механічна енергія, що одночасно забезпечується тектонічним і поверхнево-гравітаційним (гравітаційною нестійкістю середовища біля поверхні) факторами. При цьому в тих частинах цієї структурно-реологічної обстановки, де у сферу течії

залучаються слабо діагенезовані, водонасичені й відповідно дуже пластичні породи, процес тектонічної течії реалізується як гідропластичний, своєрідний в'язкий, що діє за законами гідродинаміки. За відносно невеликих тектонічних навантажень (тектонофаціях I–IV, що маркують прилеглі до розлому частини середовища) така течія здійснюється як хаотична, турбулентна. В цьому випадку їй відповідають дизгармонійні, надзвичайно неправильні за формою складчасті структури. Найімовірніше, турбулентність є результатом спільної дії відзначених тектонічного й поверхнево-гравітаційного факторів, до якого так чутливі слабодіагенезовані породи. При зростанні тектонічних навантажень і одночасному зниженні впливу поверхнево-гравітаційного

фактора течія поступово набуває лінійного характеру. Зокрема, у тектонофаціях V–VII на фоні турбулентності з'являються зони ламінарної течії у вигляді субпаралельних струмистих лінійних смуг та відносно стиснених складок із субпаралельно орієнтованими осьовими поверхнями. Цікаво, що в цій же ситуації з'являються структури спірального завихрення (ролі), які розкручуються біля цих зон (рис. 3). Ламінаризація при цьому на мікрорівні забезпечується механічним розсланцюванням глинистих і тонкоуламкових осадових порід. У вищих (VIII–X) тектонофаціях ламінаризовані структури течії фактично зливаються в єдине ціле, надаючи відповідній частині середовища сланцювато-смугастої будови.

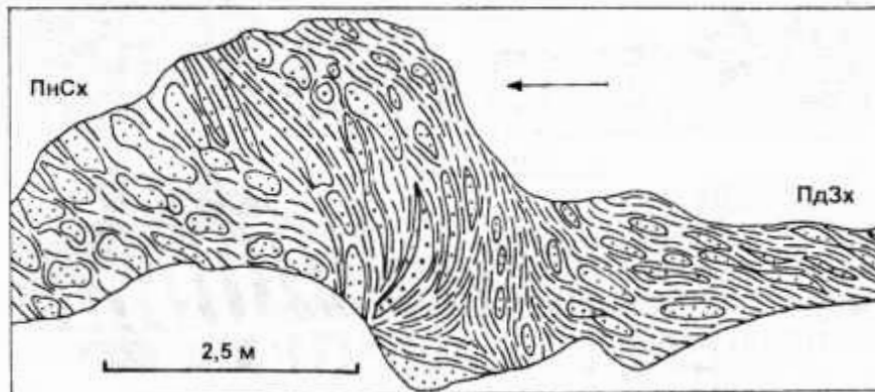


Рис. 3. Структури завихрення механічно розсланцюваних, будинованих флішодних відкладів таврійської світи в тектонофації VI. Стрілкою показано напрям течії матеріалу. Абразивне відслонення біля околиці Алушти

В інших частинах епізони, в межах яких у сферу тектонічної течії залучаються кристалічні та помірно й сильно діагенезовані, тобто більш жорсткі, ніж у попередньому випадку, породи, тектонічна течія за відносно низьких навантажень (тектонофації I–IV) здійснюється за допомогою тріщиноутворення та літологічно вибіркового пошарового кліважування й крихко-пластичного вигину. Тому деформації в цих тектонофаціях розподіляється дуже нерівномірно і найчастіше локалізується на первинно найбільш ослаблених ділянках. При цьому в першу чергу до її сфери залучаються ті мезочастини макрооб'єму, які володіють відносно невеликою межею міцності або текучості. Тому кутові відхилення поверхонь зміщення від генерального напрямку зміщення (осі а) коливаються в широкому діапазоні, і навіть, створюючи "броунівський" хаос. Подібний хаос проявляється як різноорієнтована мезотріщинуватість, що поділяє нешаруваті породи на блочки субізометричної, багатогранної форми, а в шаруваті породи – на мезо- та мікроблочки призматичної форми. При подальшому зростанні навантажень (тектонофації > IV) мезотріщинуватість змінюється мікротріщинуватістю й брекчуванням (механічним руйнуванням до уламків розміром менше першого десятку сантиметрів) і в тектонофаціях V–VII супроводжується появою магістральних мезовивів. У цих же тектонофаціях в окремих, відносно найменш в'язких породах (алевроліти, аргіліти тощо) з'являються крихкий кліваж і механічна сланцюватість. За великих навантажень, що відповідають тектонофаціям VIII та IX, брекчування спочатку переходить у катаклаз (руйнування порід до частинок псамітової розмірності й субізометричної форми) у супроводі фрикційного ковзання цих частинок, а потім за ще більших навантажень, що відповідають тектонофаціям X, у мілінітизацію (стирання породи до частинок пелітової розмірності). Певною мірою подібна послідовність процесів відтворена експериментально [23].

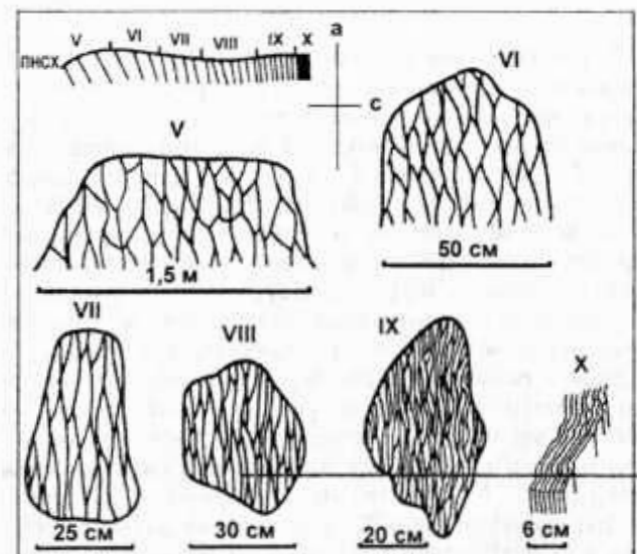


Рис. 4. Приклад зонального зменшення кутів між поверхнями кліважу (S_1) та зменшення товщини кліважних мікропелітонів у вулканогенних породах у зоні в'язкого розлому (його структурно-тектонофаціальний розріз показано зверху). Поряд і нижче – детальні зарисовки кліважу. Середній ордовик у горах Кендиктас у Південному Казахстані. Римськими цифрами позначено бали тектонофацій

У мезозоні, де до механічної енергії додається теплова, тектонічна течія порід у зонах розломів здійснюється дещо по-іншому (рис. 4). Її головною формою прояву в цій структурно-реологічній обстановці стає в'язкокліважна течія в супроводі мінеральної перекристалізації порід поздовж кліважних поверхонь. Однак, за низьких механічних навантажень (тектонофації I–IV) кліваж з'являється тільки у тонкозернистих осадових породах, шари яких першими долають межу текучості та приймають на себе пластичну деформацію середовища, тоді як у більш грубозернистих осадових, а також

у кристалічних породах формується різноорієнтована (хаотизована) мезотріщинуватість, аналогічна відзначеній вище епізональній. За подальшого зростання навантажень, тобто в тектонофації > IV, в'язкий кліваж з'являється у більшості, хіба що за винятком кременистих і деяких карбонатних порід. Він супроводжується мезорозпінзуванням, а в шаруватих середовищах – поперечним вигином і формуванням складок ламінарної (більш-менш упорядкованої за орієнтуванням осьових поверхонь) течії. Спочатку (тектонофація V) подібний кліваж відзначається низькою впорядкованістю (кути між спряженими його поверхнями досягають 30°) та супроводжується дуже незначною мінеральною пере-

кристалізацією порід. У наступних тектонофаціях, тобто при збільшенні механічних навантажень і теплопостачання, кути і відстані між кліважними поверхнями поступово зменшуються (рис. 4), але одночасно збільшується стиснення складок й упорядкування їх осьових поверхонь. Крім того, синхронно з цими змінами зростає синдеформаційна перекристалізація порід. Нарешті в тектонофації X перекристалізація стає тотальною і кліваж змінюється кристалізаційною сланцюватістю. При цьому породи набувають нової петрографічної якості, перетворюючись у мікросланці майже з ідеальною структурною анізотропією.

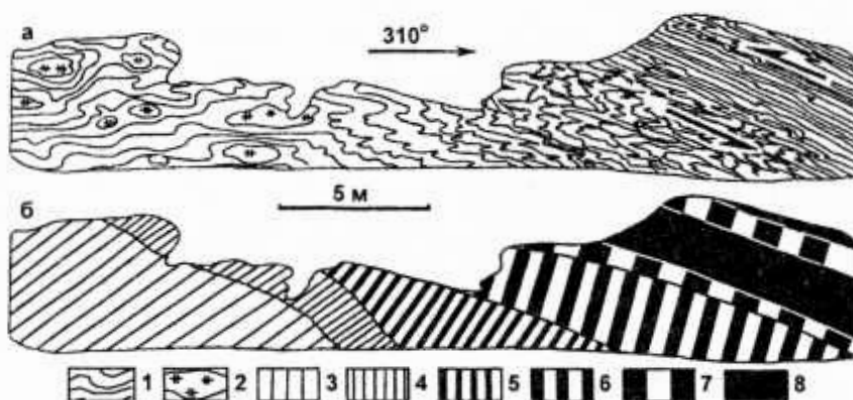


Рис. 5. Фрагмент зони тектонічної течії мігматитів побузького комплексу (неоархей), в межах якої ламінарно-турбулентна течія зонально змінюється ламінарною: 1 – структурні лінії мігматитової смугастості; 2 – окремі тіла пегматоїдних гранітів; 3–8 – тектонофації за десятибальною шкалою (3 – V, 4 – VI, 5 – VII, 6 – VIII, 7 – IX, 8 – X). Відслонення біля греблі поблизу с. Завалля)

У катазоні, яка відзначається значно суттєвішим, порівняно з попередніми структурно-реологічними обстановками, забезпеченням тепловою енергією, течія із самого початку здійснюється як високопластична (в'язка). У цій обстановці панують кристалізаційно-сланцювата (синдеформаційна орієнтована метаморфічна перекристалізація та мінеральна диференціація породи), трансляційно-сланцювата (орієнтована пластична формозміна зерен породоутворюючих мінералів), кристалізаційно-грануляційна (неорієнтована грануляційна перекристалізація та диференціація породи за формою й розмірами зерен породоутворюючих мінералів), мігматична (смугасте розшарування породи за мінеральним складом і агрегатним станом речовини). Така течія на зовнішньому обрамленні в'язких розломів (тектонофації I–IV) за малих механічних навантажень нагадує гідропластичну. Більше того, на ділянках гранітизації та мігматизації вона за таких механічних навантажень здійснюється як турбулентна, якій на мезорівні відповідає дизгармонійна складчастість, а на мікрорівні – грубо смугасті текстури порід, що зумовлені кристалізаційно-грануляційною та мігматичною течією (рис. 5). У наступних тектонофаціях, яким відповідає збільшення механічних навантажень, турбулентні структури поступово змінюються ламінарними у супроводі кристалізаційного та трансляційного розсланцювання. При цьому в тектонофаціях V–VII складки набувають певної орієнтації і кут між їхніми осьовими поверхнями та між їх крилами поступово зменшується до 15°. У тектонофації VIII здійснюється ізокліналізація складок, і до того ж включається механізм трансляційного розсланцювання порід, а в тектонофації IX починається лінійне розчленування складок. Нарешті, в тектонофації X складчасті структури зникають узагалі й середовище набуває вторинносмугастої мікро- та мезотекстури.

Обговорення результатів. Викладене свідчить, що тектонічна течія в зонах розломів несе цілий ряд ознак

самоорганізації, які властиві синергетичним системам. Розвиток такої течії має флуктуаційний (пульсуючий), направлений і незворотний характер. Форми й масштабні рівні самоорганізації цього процесу визначаються обсягами забезпечення системи механічною та тепловою енергією. Фактично фіксується три генеральні біфуркаційні пороги розвитку течії, які узгоджуються зі зростанням відзначених енергетичних витрат. Перший поріг досягається при навантаженнях, що відповідають тектонофаціям I–IV. Атрактором системи в цьому випадку є стан із різноплановими (хаотичними) траєкторіями розвитку. Течія у цьому стані функціонує, головним чином, на мезорівні й переважно здійснюється за допомогою різноорієнтованого мезотріщинування у вторинній епізоні та мезозоні й турбулентної в'язкої течії слабодіагенезованих порід у первинній епізоні та метаморфічних і гранітизованих порід у катазоні. Після проходження течією першого біфуркаційного порогу, починаючи з тектонофації V, розвиток системи переходить і на мікрорівень. При цьому у вторинній епізоні мезотріщинуватість змінюється брекчуванням (мікродробленням) порід, а в інших структурно-реологічних обстановках починається формування упорядкованих структур за допомогою механічного розсланцювання в первинній епізоні, в'язкого кліважування та кристалізаційного розсланцювання відповідно в мезозоні та катазоні у супроводі ламінарного складкоутворення в шаруватих середовищах. Другий біфуркаційний поріг припадає на тектонофацію VIII. Після його долаття в епізоні брекчування змінюється більш глибоким руйнуванням (катаклизом – мілонітизацією), у мезозоні активізується кристалізаційне розсланцювання, а в катазоні кристалізаційно-сланцювата течія порід змінюється трансляційною. Складчасті структури при цьому ізоклінізуються, а в тектонофації X узагалі зникають. Середовище в цій дислокаційній фації набуває нової структурної організації – вторинної монокліналі, основною

властивістю якої є лінеаризація (сплощення – видовження) всіх геологічних тіл, паралелізм поверхонь і довгих осей цих тіл та площинних і лінійних структурних елементів на усіх масштабних рівнях системи.

1. Баранцев Р.Г. Синергетика в современном естествознании. – М., 2003. 2. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности. – М., 1991. 3. Блюман Б.А. О трех НЕ – нелинейность, необратимость, неравновесность – геологических процессов // Отеч. геология. – 2001. – № 8. – С. 64–65. 4. Гленддорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория устойчивости и флуктуаций. – М., 2003. 5. Дульнев Г.Н. Введение в синергетику. – СПб., 1998. 6. Жаботинский А.М. Колебательные процессы в биологических и химических системах. – М., 1967. 7. Калица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. – М., 1989. 8. Князев Е.Н., Курдюмов С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. – М., 1994. 9. Лукиенко А.И. Тектонофации складчатых сооружений (на примере палеозойского Казахстана): Автореф. дис. ... д-ра геол.-минералог. наук. – К., 1993. 10. Лукиенко О.І. Типи розломів за реологічними формами прояву та їх будова, умова та фактори утворення і еволюція // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 1998. – Вип. 15. – С. 12–17. 11. Наймарк А.А. Сценарий возникновения термодинамического детерминистского хаоса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2003.

– № 5. – С. 22–31. 12. Нелинейная геодинамика / Под ред. Ю.М. Пушаровского. – М., 1994. 13. Талицкий В.Г. Проблемы моделирования тектонических деформаций и модель структурообразования в геологической среде // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геология. – 2002. – № 4. – С. 3–10. 14. Паталаха Е.И. О дифференцированной подвижности совместно деформируемых разнородных геологических тел, ее причинах и следствиях (вязкостная инверсия) // Геотектоника. – 1971. – № 4. – С. 15–25. 15. Паталаха Е.И. Тектонофациальный анализ складчатых сооружений фанерозоя. – М., 1986. 16. Паталаха Е.И., Гарагаш И.А. Бифуркация односистемного сдвигового течения земной коры как основа складкообразования // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 317. № 2. – С. 150–161. 17. Паталаха Е.И., Лукиенко А.И., Гончар В.В. Тектонические потоки как основа понимания геологических структур. – К., 1995. 18. Паталаха Е.И., Лукиенко А.И., Дербенев В.А. Тектонофации мезозоны. Атлас микроструктур. – Алма-Ата, 1987. 19. Паталаха Е.И., Лукиенко А.И., Дербенев В.А. Парагенетический ряд делимости пород при динамометаморфизме // Геология и геофизика. – 1982. – № 12. – С. 130–134. 20. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. – М., 1960. 21. Пушаровский Ю.М. Нелинейная геодинамика (кредо автора) // Геотектоника. – 1993. – № 1. – С. 3–6. 22. Хакен Г. Синергетика. – М., 1980. 23. Ridel W. Zur mechanik geologischer Bruchsheinungen // Cent. Miner., geol. And paleontol. – B. 1929. – Vol. 1. – P. 78–97.

Надійшла до редакції 30.09.04