

*Г. В. Инанишвили,
Г. Г. Гобеджишвили, Т. П. Муджири*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРЕВНЕЙ ТЕХНИКИ ОТБОЙКИ-ПРОХОДКИ НА МЕДНО-ПИРРОТИНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ГОРНОЙ РАЧИ (Грузия)

Проверка практикой позволяет наиболее приближенно восстановить научную картину организации исчезнувших производств, оценить результаты их функционирования на различных исторических этапах.

Поскольку экспериментальное испытание сложной системы древнего горнорудного производства в полном масштабе связано с большими трудностями и практически невыполнимо в рамках исследовательской работы, то исследователями были применены экспериментально-теоретические методы моделирования.

Испытание древней отбойки проводилось практически во всем диапазоне изменения коэффициента крепости горных пород. Результаты моделирования на рудах горной Рачи могут быть использованы в некотором приближении для оценки данной технологии отбойки аналогичных руд других медных месторождений в пределах соответствующих конкретных величин изменения коэффициента крепости.

К л ю ч о в ы е с л о в а: моделирование, горно-рудное производство, проходка, месторождение, руда.

Показатели оценки древних горнорудных памятников определяются на основе исходных данных, полученных в ходе полевых и лабораторных исследований, с помощью экспериментально-теоретических методов моделирования древней горной техники и технологии.

Полное осмысление механизма взаимодействия элементов системы древней горной техники и технологии, основанных часто на гипотетических, эвристических представлениях и на их экспертных оценках, выдвигает задачу их моделирования или опытной проверки в лабораторных и натуральных условиях. Только проверка практикой

позволяет наиболее приближенно восстановить научную картину организации исчезнувших производств, оценить результаты их функционирования на различных исторических этапах.

Моделирование процессов является важным средством научного познания и широко применяется при решении многих теоретических и прикладных задач естествознания и техники.

Поскольку экспериментальное испытание сложной системы древнего горно-рудного производства в полном масштабе связано с большими трудностями и практически невыполнимо в рамках исследовательской работы, то необходимо применить экспериментально-теоретические методы моделирования.

Отбойка руды клином и молотом моделировалась на 5-ти типах медных руд от слабых и трещиноватых до крепчайших и плотных, характерных для геологических условий залегания медно-пирротиновых месторождений Рачи, Сванетии, Абхазии и всего южного склона Главного Кавказского хребта:

- 1) глинистый и глинисто-песчанистый сланец, выщелоченная рудная зона;
- 2) слабоокварцованная брекчиевая руда;
- 3) окварцованный глинистый сланец;
- 4) плотная медно-пирротиновая руда;
- 5) ороговикованный глинистый сланец [Твалчредзе, 1958, с. 12—15].

Коэффициент крепости этих руд и пород изменяется от 2 до 18 по шкале Протодьяконова.

Таким образом, испытание древней отбойки проводилось практически во всем диапазоне изменения коэффициента крепости горных пород. Следовательно, результаты моделирования на рудах горной Рачи могут быть использованы в некотором приближении для оценки данной технологии отбойки аналогичных руд

других медных месторождений в пределах соответствующих конкретных величин изменения коэффициента крепости.

Орудия труда для натуральных экспериментов: стальной молот марки Ст-5 весом 5 кг и неармированный бур из стали марки Ст-5 с закаленным прямым лезвием типа зубила. Длина бура — 20 см, диаметр — 25 мм, длина лезвия — 4 см. Применялась также стальная кирка, более эффективная при отбойке трещиноватых руд и пород.

Комплексной экспедицией НАН Грузии (с участием археологов, геологов, горняков и металлургов) эксперименты моделирования проводились на медных месторождениях Горной Рачи, залегающих в районе сел Геби и Гона (рис. 1, 2). На каждом из вышеуказанных типов руд и пород проводилось по 4 эксперимента. Организация и условия эксперимента были следующие. С целью получения наиболее приближенных данных на всех типах руд работал один и тот же горнорабочий-забойщик Гебской разведочно-поисковой партии, имевший большой опыт отбойки-проходки забоев геолого-разведочных штролен одноручным и двуручным бурением в аналогичных породах. Время каждого эксперимента составляло 8 часов. Отбойка-проходка велась как в открытых, так и в подземных выработках.

Для отбойки крепких, плотных руд и пород по периметру отбиваемого куска площадью 10×15 см, с помощью клина (бура) и молота делались опоясывающие врубовые канавки глубиной до 5 см и шириной до 3 см, после чего оконтуренный и ослабленный таким образом кусок отбивался ударами молота. Иногда, на особенно крепких участках руд, оконтуренную площадь дополнительно ослабляли поперечной врубовой канавкой по центру. За результатами эксперимента велись хронометражные и другие наблюдения. В частности, производилось измерение общего объема отбитой массы (коэффициент разрыхления принимался $K_{\text{раз}} = 1,5$) с помощью мерных сосудов; определялся общий вес, плотность, кусковатость отбитой горной массы и др.

В зависимости от трещиноватости и крепости руд и пород размеры отбиваемых кусков изменялись: длина — от нескольких сантиметров до 15—20 см, ширина и высота в среднем — от 5 до 12 см. Вес кусков в среднем составлял 2—3 кг, достигая иногда 5—6 кг.

Определение крепости горных пород производили экспресс-методом, который непосредственно связан с древней техникой горных работ и разработан в результате проведения нами экспериментов по древней добыче в полевых условиях. Он позволяет определять крепость горных пород в процессе разработки месторождений.

Известные экспресс-методы определения крепости горных пород требуют специального оборудования и инструмента. На наш взгляд, наиболее простыми методами определения крепости горных пород являются таковые, где применяется динамическое приложение нагрузки.

Предлагаемый метод связан с дробимостью горных пород и относится к методам испытаний с объемным разрушением образцов, с оценкой по характеристикам продуктов разрушения многократными ударами дробящим телом при свободном падении.

Прототипом предлагаемого метода принимается метод М. М. Протодьяконова (младшего), обычно называемый методом толчения [Шухардин, 1952, с. 197, 198; 1957, с. 121—129], основанный на законе Реттингера о пропорциональной связи энергии разрушения со вновь образованной поверхностью.

Определение крепости горных пород разрушением испытуемых образцов повторными ударами груза, сбрасываемого с некоторой постоянной высоты (методы М. М. Протодьяконова-младшего и др.), требует применения специального копра, набора сит, объемметра, технических весов для взвешивания навесок измельченных фракций и других средств. Все это усложняет процесс определения коэффициента крепости горных пород.

Предлагаемый нами метод наиболее прост и экономичен по сравнению с вышеуказанными методами, т. к. использует простейшие инструменты: обычный ручной молот (кувалду) и мерную линейку или рулетку, что сводит к минимуму затраты времени, труда и других средств. Это особенно важно в полевых условиях.

Сущность предлагаемого метода заключается в следующем. Отобранный непосредственно в забое штупф горной породы (без видимых трещин), длина, ширина и высота которого изменяется от 8 до 15 см, (объем приблизительно $1000\text{—}2500\text{ см}^3$), устанавливается на твердое массивное основание и подвергается многократным ударам груза — ручного молота весом 5 кг, падающего свободно с постоянной высоты 0,5 м. За показатель сопротивляемости разрушению или крепости горной породы принимается количество ударов, необходимое для разрушения всего образца на куски определенного размера (до 4 см), отнесенное к первоначальному объему образца.

Для составления шкалы крепости горных пород по предлагаемому методу и установления ее соответствия со шкалой крепости, по М. М. Протодьяконову-старшему, т. е. по методу испытаний образцов правильной формы на одиночное сжатие, нами были проведены полевые и лабораторные испытания образцов средней крепости, крепких и крепчайших пород, отобранных из забоев геологоразведочных выработок медных и сурьмяных месторождений Горной Рачи. При этом, для обоих методов испытаний соблюдалось условие идентичности пород.

Результаты этих испытаний (таб. 1), показали четкую корреляционную связь (коэфф. корреляции — 0,91) между предлагаемым нами показателем и коэффициентом крепости по М. М. Протодьяконову.

Отбойка руды, как отделение ее в виде кусков от рудного массива, в древнем горнорудном

производстве занимала ведущее место, во многом определяя порядок, организацию работ и показатели технологических схем добычи. Изучение данного процесса во взаимосвязи с различными геологическими условиями, дает возможность восстановить в целостности всю сложную картину функционирования конкретного горнорудного производства на определенном этапе его истории.

Выявленные в древних рудниках Рачи, Сванетии и Абхазии орудия отбойки (каменные молоты, обломки бронзовых клиньев), следы ударов на стенках выработок в виде клиновидных сколов и углублений 2—3 см, а также следы ударов на самих молотах в виде сколов, выбоин на их торцах, кучи отбитой руды, лежащие у забоев, говорят о том, что здесь отбивали руду вручную, нанося по рудному массиву удары бронзовым клином и каменным молотом.

Размеры молотов (длина, ширина, толщина) изменялись, в основном, от $14 \times 11 \times 8$ см до $22 \times 13 \times 9$ см, весом 2—5 кг; применялись и молотки небольших размеров — $10 \times 8 \times 5$ см, весом до 1,5 кг [Инанишвили и др., 2001, с. 21, 22].

Результаты петрографических и физико-механических исследований собранных нами каменных молотов, образцов руд и пород показали, что древние горняки для орудий отбойки-дробления использовали самые плотные, вязкие и крепкие горные породы: габбро-диабаз, порфиновый диабаз, диорит, грано-диорит и др. В основном, применяли габбро-диабазовые молоты, крепость которых, достигая 25 по шкале Протодякова, иногда в несколько раз превышает крепость отбиваемых и дробимых ими руд и пород. Исследования ультразвуковым методом физико-механических параметров образцов горных пород из древних рудников Рачи также показали преимущества упруго-деформационных свойств диабаза, которые особенно важны при ударных нагрузках (таб. 2).

Отбойка клином и молотом без огневого способа моделировалась нами на медных месторождениях Горной Рачи. Как показали эксперименты, производительность такой технологии очень низка и при стальных клиньях в зависимости от крепости руды изменяется в пределах 0,03—0,3 т/чел-день, т. е. в десять раз.

Принимая эти результаты, полученные рабочим за 8 часов, в качестве показателя работы 1 человека-дня древнего горняка.

Ход наших экспериментов показал, что к 4—5 часам такой работы производительность упала почти в 2 раза, а к 7—8 часам снизилась в 3—4 раза. С таким темпом снижения производительности дальнейшее продолжение отбойки одним человеком бессмысленно. Очевидно, в одном забое на отбойке-проходке работало не менее 2-х человек, попеременно сменяя друг друга. В таком случае их средняя производительность должна быть близка к нашим показателям.

Обработка данных экспериментов моделирования методами математической статистики

показывает, что производительность древней отбойки-проходки клином и молотом обратно пропорциональна величине крепости отбиваемых горных пород. Эта зависимость имеет вид гиперболы. При стальных орудиях труда (будем называть их железными) графики полученных функций выражаются уравнениями:

$$P_{\text{отб.ж}} = \frac{0,7}{f} \quad (3.1); \quad V_{\text{ж}} = \frac{0,17}{f} \quad (3.2),$$

где $P_{\text{отб.ж}}$ — производительность отбойки руды при железных орудиях труда, т/чел-день;

$V_{\text{ж}}$ — скорость проходки выработки сечением 1,5 м при железных орудиях труда, м/чел-день;

f — коэфф. крепости руды по Протодякову, изменяющийся от 1 до 20.

Для получения количественных характеристик отбойки-проходки бронзовыми и медными орудиями нам не представилось возможности. Были проведены специальные теоретические исследования: анализ данных по изучению физико-механических свойств современных и археологических изделий из меди, бронзы, железа и углеродистой стали, расчеты ряда показателей и др. Как известно исторический процесс совершенствования оружия и орудий труда, несущих режущую, ударно-дробящую, ударно-истирающую функции, идет по пути повышения твердости материала, с повышением его прочностных свойств, обеспечивающих максимальную сопротивляемость инструмента указанным воздействиям и наибольшую эффективность работы.

Твердость изделий из меди, бронзы, железа и углеродистой стали изменяется в широких пределах в зависимости от технологии их изготовления, методы которых (литье, холодная и горячаяковка и др.) были хорошо известны древним металлургам [Тавадзе, Сакварелидзе, 1956, с. 62—64; Тавадзе и др; 1987, с. 49].

Учитывая высокое искусство древних металлургов и большой опыт древних горняков по отбойке крепких руд, полагаем, что согласно данным табл. 3, для приближенных расчетов поправочных коэффициентов производительности отбойки-проходки медными и бронзовыми орудиями (после специальной термо — механической обработки) принимаем средние значения твердости: меди — 75 кг/мм², бронзы — 156 кг/мм², углеродистой стали — 197,5 кг/мм², играющих большую роль в эффективности работы инструментов, несущих ударную функцию.

По сравнению с железными орудиями (углеродистая сталь), ударное воздействие медных орудий в 3,3 раза меньше и бронзовых — в 1,9 раза меньше. Приняв коэффициент ударного воздействия и производительности железных орудий $K (R \cdot H \cdot 10^{-6})=1$, получим соответствующие коэффициенты относительной производительности отбойки-проходки.

Эти коэффициенты применяются нами при определении производительности труда, расхода материалов, численности рабочих и других показателей древнего горного производства.

Введя в эмпирические формулы (3.1) и (3.2) коэффициенты $K_o=0,53$, $K_m=0,3$, $K_{ж}=1$, получим семейства кривых и их уравнений, позволяющих определять производительность отбойки и скорость проходки железными, медными и бронзовыми орудиями ($P_{отб.ж}$, $P_{отб.бр}$, $P_{отб.м}$) в любом диапазоне изменения крепости пород. С учетом полученных коэффициентов формулы (3.1) и (3.2) примут следующие выражения:

$$\begin{aligned} P_{отб.ж} &= \frac{0,7}{f} & K_{ж} &= \frac{0,7}{f} \cdot 1 \\ P_{отб.бр} &= \frac{0,7}{f} & K_{бр} &= \frac{0,7}{f} \cdot 0,53 = \frac{0,37}{f} \\ P_{отб.м} &= \frac{0,7}{f} & K_{м} &= \frac{0,7}{f} \cdot 0,3 = \frac{0,21}{f} \end{aligned}$$

где $P_{отб}$ — производительность отбойки без огневого способа т/чел-день;

f — коэфф. крепости пород по Протодяконову;

$$\begin{aligned} V_{отб.ж} &= \frac{0,17}{f} & K_{ж} &= \frac{0,17}{f} \cdot 1 \\ V_{бр.} &= \frac{0,17}{f} & K_{бр} &= \frac{0,17}{f} \cdot 0,53 = \frac{0,09}{f} \\ V_{м} &= \frac{0,17}{f} & K_{м} &= \frac{0,17}{f} \cdot 0,3 = \frac{0,05}{f} \end{aligned}$$

где V — скорость проходки выработки сечения $1,5 \text{ м}^2$, м/чел-день.

Полевые исследования древних рудников, анализ горно-геологических условий разработки медных месторождений Грузии и других стран показывают, что в природе наиболее распространены медные руды средней крепости и крепкие, коэффициент крепости которых меняется, в основном, от 7 до 14. Для этого диапазона производительность древней отбойки (без огневого способа) будет составлять:

медными орудиями — 0,015 — 0,03 т/чел-д,
бронзовыми орудиями — 0,026 — 0,053 т/чел-д,
железными орудиями — 0,05 — 0,100 т/чел-д;
скорость проходки забоя площадью поперечного сечения $1,5 \text{ м}^2$:

медными орудиями — 0,0036 — 0,007 п.м/чел-д,
бронзовыми орудиями — 0,0054 — 0,013 п.м/чел-д,
железными орудиями — 0,012 — 0,024 п.м/чел-д.

Проводимые нами эксперименты в глинисто-песчаных сланцах при $f=3-5$ дали производительность от 0,162 до 0,310 т/чел-д. [Иванишвили и др., 2010, с. 106, 107].

Отбойка руды огневым способом моделировалась нами на основе экспериментов в условиях

месторождений Горной Рачи и соответствующих расчетов. Как показали эксперименты, предварительное ослабление горного массива огневым способом с последующим разрушением ударами клина и молота увеличивает производительность древней отбойки-проходки в среднем в 2,5 раза. Введя этот коэффициент в формулы, будем иметь показатели при разных материалах орудий труда:

$$\begin{aligned} P_{огн.отб.ж} &= \frac{0,7}{f} \cdot 2,5 = \frac{1,75}{f} \\ P_{огн.отб.бр.} &= \frac{0,37}{f} \cdot 2,5 = \frac{0,93}{f} \\ P_{огн.отб.м.} &= \frac{0,21}{f} \cdot 2,5 = \frac{0,53}{f} \end{aligned}$$

где $P_{огн.отб.}$ — производительность огневой отбойки т/чел-день;

$$\begin{aligned} V_{огн.ж} &= \frac{0,17}{f} \cdot 2,5 = \frac{0,43}{f} \\ V_{огн.бр.} &= \frac{0,09}{f} \cdot 2,5 = \frac{0,23}{f} \\ V_{огн.м.} &= \frac{0,05}{f} \cdot 2,5 = \frac{0,13}{f} \end{aligned}$$

где $V_{огн.}$ — скорость огневой проходки выработки сечением $1,5 \text{ м}^2$, п.м/чел-день,

f — коэффициент крепости пород, по Протодяконову.

Результаты экспериментов по производительности отбойки-проходки в зависимости от типов горных пород и показатели месячной производительности являются расчетными. Показатели скорости проходки (м/чел-день), представленные в данной таблице, устанавливались следующим образом. При нашем эксперименте за один чел-день отбивалась лишь небольшая часть забоя в виде кусков неправильной формы и различных размеров. В этом случае трудно точно определять среднюю проходку забоя прямыми замерами. Поэтому скорость проходки мы рассчитывали как величину продвижения всей площади забоя, принятой нами равной $1,5 \text{ м}^2$. То есть, объем массы, отбитой за один чел-день делился на площадь $1,5 \text{ м}^2$ — наиболее характерную площадь поперечного сечения древних проходческих выработок Горной Рачи и других горнорудных районов древности (Таб. 4).

Таким образом, объединяя результаты моделирования и функциональные зависимости вышеприведенных данных в одну общую математическую модель расчета показателей эффективности древней технологии горнометаллургических разработок Рачи определяем уровень данного производства эпохи бронзы в

период его пика (XII—X вв. до н. э.) [Инанишвили и др., 2010, с. 108].

Получена широкая номенклатура технико-экономических показателей характеризующих максимальный уровень техники и масштабов производства исследуемых очагов на примере Горной Рачи. Среди них выделены основные характеристики периода пика: время пика — 200 лет, глубина разработки по вертикали — 20—33 м (по горизонтали — 100—110 м и более), объем рудника — горного сооружения (суммарный объем всех выработок) — 500—1000 м³, добыто руды за период пика — 120000—155000 т, годовая производительная мощность — 600 — 800 т, суточная добыча — 3,0—4,0 т, производительность труда горнорабочего (по добыче и обогащению) — 0,015—0,023 т/чел-дн, трудоемкость добычи и обогащения 1 т руды — 44,0—67,0 чел-дней, общее число горнорабочих по производству — 150—230 чел/сутки. Выплавлено меди (за 200 лет) — 2000—2400 т, годовая производственная мощность по выплавке — 10—12 т, суточная выплавка — 0,05—0,06 т, общее число металлургов и вспомогательных рабочих (обжиг, плавка в горне, заготовка леса и углей и др.) в сутки — 100—130 чел., всего занято рабочих по горнометаллургическому производству — 250—360 чел/сутки.

Анализ параметров горнометаллургических разработок Рачи, Сванетии и Абхазии установили идентичность отдельных элементов горной техники и технологии; с учетом общности археологической культуры (Колхидской), торгово-транспортных исторических коммуникаций, геолого-географических и др. факторов, указанная группа очагов рассматривается нами как система горнометаллургического производства эпохи поздней бронзы, которую мы называем «Северо-Колхидской».

Гобеджишвили Г. Ф. Памятники древнего горного дела в Раче / Г. Ф. Гобеджишвили // Дзеглис мегобари. — 1966. — № 6. — С. 16—20.

Инанишвили Г. В. К истории горно-металлургического производства Колхиды / Г. В. Инанишвили, В. Г. Майсурадзе, Г. Г. Гобеджишвили, Т. П. Муджири // РА. — 2001. — № 3. — С. 18—24.

Инанишвили Г. В. Древнейшее горнорудное и металлургическое производство Грузии / Г. В. Инанишвили, В. Г. Майсурадзе, Г. Г. Гобеджишвили. — Тбилиси, 2010.

Тавадзе Ф. Н. Структура и некоторые свойства медно-мышьяковых сплавов / Ф. Н. Тавадзе, Т. Н. Сакварелидзе // Труды Института металлов и горного дела АН ГССР. — 1956. — Т. VII. — С. 59—72.

Тавадзе Ф. Н. Этапы развития металлургии бронзы в Грузии / Ф. Н. Тавадзе, Т. Н. Сакварелидзе, Г. В. Инанишвили // Кавказ в системе палеометаллических

культур Евразии: Материалы I симпозиума «Кавказ и Юго-восточная Европа в эпоху раннего металла» (1983 г.). — Тбилиси, 1987 — С. 44—50.

Шухардин С. В. Источники и методы историко-технического исследования / С. В. Шухардин // Известия АН СССР: Отделение технических наук. — 1952. — № 8. — С. 193—200.

Шухардин С. В. Основные этапы развития методов разрушения горных пород / С. В. Шухардин // Вопросы истории естествознания и техники. — 1957. — Вып. 3. — С. 121—129.

Г. В. Інанишвілі,
Г. Г. Гобеджишвілі, Т. П. Муджири

МОДЕЛЮВАННЯ ДАВНЬОЇ ТЕХНІКИ ВІДБІЙКИ-ПРОХОДЖЕННЯ НА МІДНО-ПІРРОТИНОВИХ РОДОВИЩАХ ПІРСЬКОЇ РАЧІ

Перевірка практикою дозволяє найбільш вірно відтворити наукову картину організації виробництв, які цезли, оцінити результати їх функціонування на різних історичних етапах.

Оскільки експериментальне випробування складної системи стародавнього гірничорудного виробництва в повному обсязі пов'язане з великими труднощами і його важко реалізувати в рамках дослідницької роботи на практиці, тому дослідники використовували експериментально-теоретичні методи моделювання.

Випробування стародавньої відбійки проводилось практично в усьому діапазоні змін коефіцієнта міцності гірських порід. Результати моделювання на рудах гірської Рачі можуть бути використані з деяким наближенням для оцінювання даної технології відбійки аналогічних руд інших мідних родовищ в межах відповідних конкретних величин змін коефіцієнта міцності.

G. Inanyshvili,
G. Gobejishvili, T. Mujiri

MODELLING OF THE ANCIENT TECHNIQUE OF BREAKING IN COPPER-PYRRHOTITE FIELDS IN THE RACHA REGION

The evaluation of ancient mining sites are determined on the basis of initial data obtained from field and laboratory studies with experimental and theoretical modeling of the ancient mining equipment and technology.

Full understanding of the mechanism of interaction between the elements of the ancient mining equipment and technology, often based on hypothetical, heuristic ideas and their expertise, puts the problem of modeling and experimental verification in laboratory and field conditions. Only the try-out can restore a scientific picture of extinct manufactures, to assess the results of their operation at different stages of history.

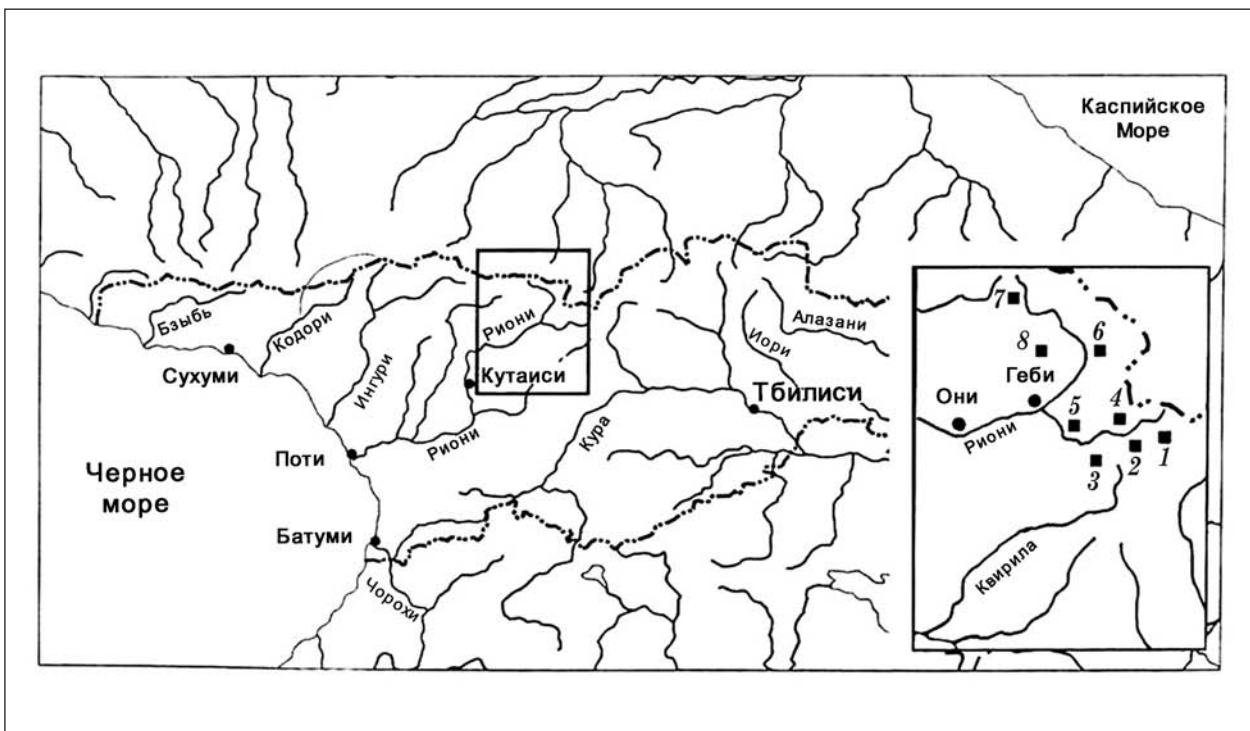


Рис. 1. Памятники древнего горнорудного производства Рачи: 1 — Цкарспари; 2 — Чвешо; 3 — Хвардзахети; 4 — Чкорналиани; 5 — Шошети; 6 — Зопхито; 7 — Брили; 8 — Квацихура

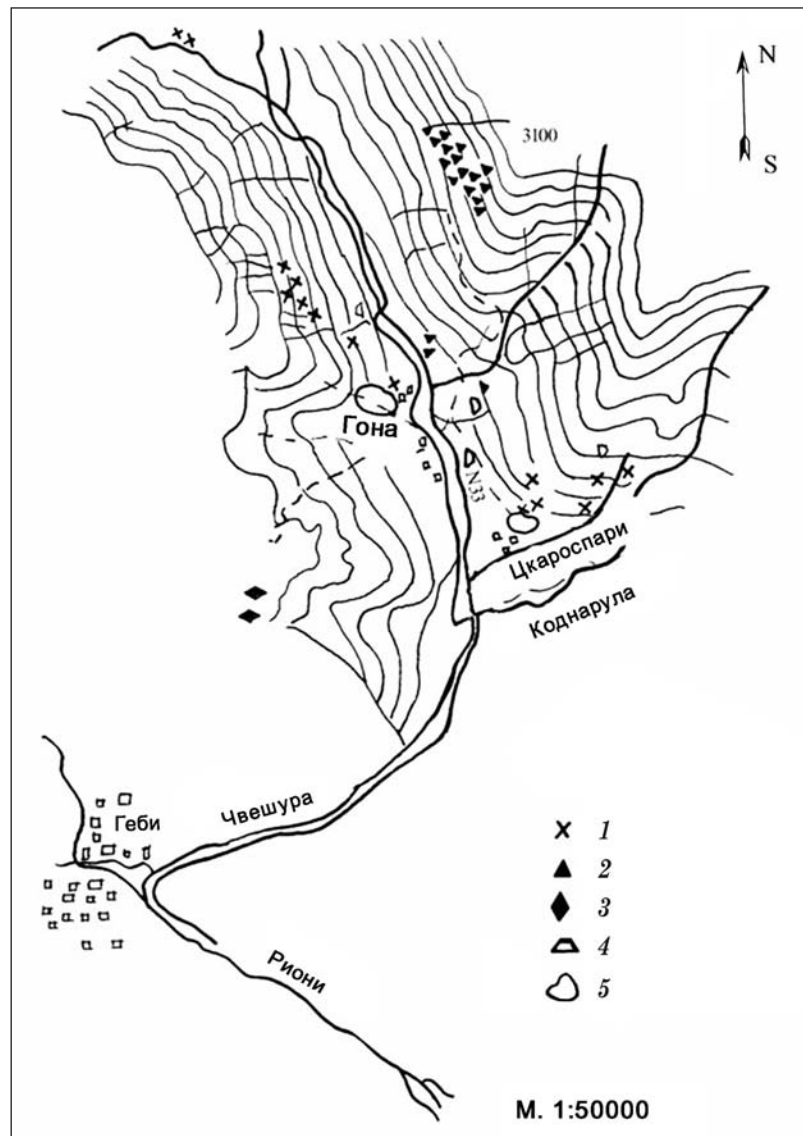


Рис. 2. Объекты горнорудного производства Рачи (Чкорналиани, Хвардзахети): 1 — медные рудники; 2 — сурьмяные рудники; 3 — мышьяковые рудники; 4 — современные геологические разработки; 5 — отвалы пустой породы

Таблиця 1

№	Наименование горных пород	Объем образца	Кол-во ударов	Показатель удельной работы разр.	Коэфф. крепости по ММП
1	Альбитофир	1,8	57	32	9,3
2		1,9	47	25	9,0
3		2,2	40	18	9,2
4	Альбитофир изменен.	1,2	25	21	6,1
5		1,6	24	15	6,9
6	Брекчевидная руда слабоокварцованная	2,1	25	12	5,7
7		1,9	17	9	4,2
8		2,3	30	13	6,2
9	Кремень	1,7	284	167	23,7
10		2,2	334	152	22,3
11		1,8	171	95	21,5
12	Глинистый сланец окв.	1,4	94	67	17,5
13		1,2	50	42	17,6
14		1,6	165	103	17,9
15	Диабаз	1,8	157	87	19,5
16		1,9	179	94	17,5
17		2,3	163	71	18,5
18	Гранит белый с/з	1,9	76	40	14,9
19		1,5	108	72	14,1
20		1,1	53	25	12,2
21	Гранит черный с/з	1,6	48	30	14,0
22		1,7	112	66	15,3
23		2,2	125	57	13,1
24	Гранит зеленоватый м/з	1,9	232	122	22,2
25		1,4	143	102	21,8

Таблиця 2

№	Наименование горных пород	Плотность 10^{-3} кг/м ³	Скорость продольн. волны	Скорость поперечн. волны	Модуль Юнга	Коэфф. Юнга	Акустическая жесткость
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Альбитофир	2,6	4,88	2,60	4,58	0,30	12,68
2	Глинистый сланец окварцованный	2,75	6,50	3,18	7,63	0,33	17,87
3	Кварц-меднопирротиновая рудная зона	2,64	6,75	3,16	7,16	0,36	17,82
4	Диабаз измененный, альбитизированный	2,7	6,42	3,02	6,84	0,36	17,33
5	Диабаз	2,9	7,62	3,32	8,98	0,38	22,10
6	Гранит белый	2,6	5,34	2,79	5,39	0,31	13,88
7	Гранит черный	2,8	5,89	3,00	6,79	0,32	16,49
8	Гранит зеленоватый	2,9	6,61	3,15	7,62	0,36	19,10
9	Кремень	2,7	6,56	3,13	7,00	0,36	17,71
10	Дациит	2,6	4,82	2,56	4,4	0,30	12,54

Таблица 3

Название металла	Плотность, ρ г/см ³			Продольная скорость ультразвуку. волны, С. м/сек	Акустическая жесткость $R=\rho c \cdot 10^{-6}$ г/см, см/сек	Твердость НВ, кг/мм ²			Показатель ударного воздействия $R \cdot H \cdot 10^{-6}$	Коэфф. относит. ударного воздействия
	от	до	сред.			от	до	сред.		
Медь	8,6	8.9	8,75	3550	3,11	30	120	75	233	0,30
Бронза	7,4	8.8	8,10	3260	2,64	60	252	156	411	0,53
Железо – сталь	7,5	7,70	7,60	5105	3,93	70	325	197,5	776	1

Таблица 4

Крепость пород по Протогьяконову	Наименование и характеристика пород	Плотность пород т/м ³	Производительность труда					
			в человеко-день			в человеко-день		
			м ³	т	м	м ³	т	М
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2–4	Глинистый сланец, выщелоченная меднорудная зона	3,2	0,076	0,242	0,050	2,28	7,26	1,50
		3,2	0,068	0,222	0,045	2,04	6,66	1,36
		2,9	0,107	0,310	0,071	3,21	9,30	2,13
		3,0	0,092	0,276	0,061	2,76	8,28	1,83
4–6	Слабоокварцованная брекчия с медной минерализацией	2,9	0,080	0,235	0,054	2,40	7,05	1,62
		3,2	0,050	0,162	0,033	1,50	4,86	0,99
		3,3	0,054	0,178	0,036	1,62	5,34	1,08
		3,0	0,073	0,220	0,048	2,19	6,60	1,44
6–9	Окварцованный глинистый сланец	2,7	0,041	0,112	0,027	1,23	3,36	0,81
		2,7	0,035	0,095	0,023	1,05	2,85	0,69
		2,7	0,017	0,047	0,011	0,51	1,42	0,33
		2,8	0,024	0,069	0,016	0,72	2,08	0,48
9–13	Плотная медно-пирротиновая руда	3,3	0,024	0,079	0,015	0,72	2,37	0,45
		3,1	0,015	0,048	0,010	0,45	1,44	0,30
		3,0	0,017	0,050	0,011	0,51	1,50	0,33
		2,8	0,023	0,065	0,015	0,69	1,95	0,45
13–18	Ороговикованный глинистый сланец	2,8	0,015	0,042	0,010	0,45	1,26	0,30
		2,8	0,010	0,028	0,006	0,30	0,84	0,18
		2,8	0,006	0,017	0,004	0,18	0,51	0,12
		2,7	0,011	0,030	0,007	0,33	0,90	0,21