

УДК 622.270:519.8

А.М. Валуев, Д.В. Пастихин

**РАЗВИТИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ
В ТРУДАХ В.В. РЖЕВСКОГО И ЕГО НАУЧНОЙ ШКОЛЫ**

Описаны основные направления и результаты исследований по компьютерному моделированию открытых горных работ, начатых по инициативе академика В.В. Ржевского и продолженных его учениками и последователями.

Ключевые слова: математическое моделирование, открытые горные работы, режим горных работ, технологические процессы, исследование операций.

Семинар № 17

По инициативе В.В. Ржевского и при его личном участии в 1960-е гг. в МИРГЭМ-МГИ начал развиваться целый спектр научных направлений в горном деле, новых для того времени. Важное место среди них заняли и вопросы математического моделирования процессов и технологии горного производства, причем данному направлению сразу был придан практический характер благодаря приобретению ЭВМ и созданию вычислительного центра МГИ на базе кафедры высшей математики.

Особый интерес к данному направлению науки и практической деятельности со стороны В.В. Ржевского именно в эти годы был далеко не случайным. По существу именно в это время (с конца 1950-х гг.) электронная вычислительная техника, в первое десятилетие своего существования имевшаяся в единичных экземплярах и применявшаяся лишь в узких пределах крупнейших военно-технологических проектов, бурно развивалась и становилась доступной в научной сфере. Новые возможности, которые за этим стояли, справедливо оценивались очень высоко. Эти возможности, однако, не могли быть легко реализованы, и породили новые

научные и технические проблемы, решение которых порой растянулось на десятилетия.

Само математическое моделирование в современном понимании стало детищем новых вычислительных технологий. Произошел массовый сдвиг прикладных исследований от аналитических методов к численным расчетам. В МИРГЭМ-МГИ наметились два направления применения вычислительной техники для решения задач горного производства:

- автоматизация инженерных методов;
- математическое моделирование технологических процессов.

Второе направление, естественно, являлось гораздо более сложным в реализации, но при этом сулило и гораздо большие возможности, и поэтому, несмотря на то, что первая тенденция тоже, получила свое развитие, возобладала вторая.

Возможно, в этом сказалось то обстоятельство, что взгляды В.В. Ржевского на значение компьютерных методов для горной науки и промышленности изначально были весьма широкими. Приведем цитаты из его статьи «Математику и счетно-решающую технику — на службу горной

промышленности», открывающей сборник 1963 года издания «Аналитические методы исследования и математическое моделирование процессов [1].

- «...Выше приведен далеко не полный перечень сфер [и проблем] горного производства [гидротранспорт, определение нагрузки на крепь, внезапные выбросы угля и газа, горные удары, предварительное осушение, обводнение и замораживание массивов горных пород], в которых может и должен использоваться современный математический аппарат. Возможности использования этого аппарата сейчас особенно расширились в связи с бурным развитием ЭВМ...».

- «...В последние годы в экономической науке наметилось новое направление — планометрика, занимающаяся теорией и методами планово-экономических расчетов с использованием математических методов и электронной техники. Методы линейного программирования используются и при решении отдельных экономических задач горного дела, например, рассчитывают оптимальные породопотоки шахт и карьеров...».

- «...В практических задачах горной промышленности ... важной стороной применения ЭВМ является использование их как средств автоматических систем управления горными процессами. Быстродействующие ЭВМ могут быть использованы, с одной стороны, для выработки команд управления и передачи их для исполнения на управляемый объект. С другой стороны, машина, получая информацию о действительном состоянии дел на управляемом объекте, может контролировать ход выполнения своих команд».

С 1960-х гг. среди вычислительных методов получил широкое распространение метод статистических испытаний и его применение для имитационного моделирования, что явилось новым словом в исследовании технологических и производственных процессов. Заявила о себе новая научная дисциплина — исследование операций — предложившая математические модели и методы принятия проектных и плановых решений. Все эти новые подходы отразились и в исследованиях МИРГЭМ-МГИ. Можно выделить три основных направления в математическом моделировании, развивавшихся в то время в научной школе В.В. Ржевского:

1. разработка принципов и методов математического моделирования месторождений и горнотехнических объектов;

2. имитационное моделирование технологических процессов горного производства;

3. математическое моделирование разработки месторождений открытым способом в целях исследования режима горных работ;

4. разработка оптимизационных методов обоснования конечного контура карьера и режима горных работ;

5. развитие моделей исследования операции при проектировании и планировании.

Первое направление, выразившееся в первую очередь в работах С.Д. Коробова и его учеников, развивалось наиболее интенсивно. Исследования были начаты в тот период, когда научное направление моделирования горных работ делало первые шаги не только в МГИ, но и во всей мировой науке и инженерной практике. Из-за неразвитости методов моделирования в области горного производства решать приходилось абсолютно все вопросы, в т.ч.:

- создание цифровых моделей месторождений, что было в корне отлично от геологической и инженерной практики предшествующих десятилетий;

- разработка соответствующих методов подсчета запасов;

- моделирование собственно горных выработок

- моделирование развития горных работ

В этом направлении уже в первое десятилетие, наряду с освоением первых достижений зарубежной науки, были развиты оригинальные подходы. Важным и, можно сказать, счастливым обстоятельством стало то, что С.Д. Коробов начал работу над своей кандидатской диссертацией по инициативе В.В. Ржевского, будучи инженером-открытчиком и в то же время, имея одновременно хорошие математические способности, что подтвердили впоследствии десятилетия успешного преподавания на кафедре Высшей математики. Поэтому процесс математического моделирования у него почти всегда был направлен на решение, прежде всего технологических задач. Благодаря соединению инженерного взгляда на горные работы с принципами математического моделирования были развиты два различных способа представления месторождения и карьера в зависимости от типа залегания полезного ископаемого. При крутом и наклонном залегании в основу оцифровки месторождения и карьера в соответствии с мировыми тенденциями был положен блочный способ их представления. Однако при моделировании разработки горизонтальных и пологих месторождений были развиты т.н. «матричные» (контурные) модели месторождения, стоящие ближе к его технологическому представлению в задачах проектирования карьеров.

Действительно, если глубина карьера постоянна или почти постоянна, основное значение имеет форма борта в плане. В работах [2,3] было предложено для различных этапов применять разные системы декартовых координат, так, чтобы ось ординат шла примерно вдоль линии фронта горных работ, и строить для каждой такой системы совокупность прямых линий, параллельных оси ординат, с равными расстояниями между ними. Фронт горных работ характеризуется координатой точек его пересечения с такими линиями. Здесь предвосхищается секторная модель борта карьера, предложенная И.Б. Табакманом [4], с тем, однако, отличием, что сектора фактически являются изогнутыми полосомами с ломаными границами.

Во-вторых, моделирование залежи есть в данном случае моделирование поверхностей кровли и почвы пласта (или пластов). Исходными данными для этого служат высотные отметки кровли и почвы для разведочных скважин. По этим данным поверхность может быть аппроксимирована методом триангуляции, подобно земной поверхности. Были предложены алгоритмы соединения точек (устьев скважин) для разбиения плоскости на треугольники. Впоследствии для этого случая была предложена также билинейная интерполяционная схема [5].

К сожалению, при всей феноменальной работоспособности и полной самоотдаче в любимом деле С.Д. Коробову не удалось довести свои программные разработки до уровня законченного программного продукта, в том понимании, которое сейчас вкладывается в ЭТО понятие, хотя он и был близок к этому. Зато гибкость и многообразие подходов, учет особенностей залегания полезного ископаемого и технологии открытых горных работ для самых разных условий,

привели к тому, что в своих исследованиях и практических разработках С.Д. Коробов использовал гораздо более широкий круг подходов и методов, чем тот их набор, который применяется в известных сегодня программных комплексах.

В 1980-е гг. направление математического моделирования горных работ продолжало развиваться, в особенности на кафедре Вычислительных машин (ныне кафедра САПР). Было приобретено специализированное оборудование — планшетный и рулонный графопостроитель. Важным проектом обещала стать учебно-исследовательская САПР открытых горных работ, которая создавалась на кафедре Вычислительных машин по инициативе В.В. Ржевского под научным руководством С.Д. Коробова и В.А. Горбатова [6]. К сожалению, ставка на использование ЕС ЭВМ, к тому же обслуживаемых сторонней организацией, оказалась ошибочной, а разработанное программное обеспечение оказалось, по существу, невостребованным после массового перехода на использование персональных компьютеров. Это произошло в самом конце жизни Владимира Васильевича, и можно с горечью предполагать, что если бы его жизнь и творческая активность продлилась бы, эта программная разработка могла бы возродиться на новой платформе. С работами по направлению САПР открытых горных работ было связано и проведение теоретических исследований [7, 8]. В частности, в последней работе были систематизированы и математически обоснованы алгоритмы решения наиболее распространенных задач горно-геометрического анализа и произведен подробный анализ точности аппроксимации формы карьера различными методами.

По второму направлению в качестве одной из первых следует указать кандидатскую диссертацию М.И. Варийчука [9], выполненную под руководством П.И. Томакова, ученика В.В. Ржевского. Работы в этом направлении на кафедре Технологии, механизации и организации открытых горных работ, которой длительное время заведовал В.В. Ржевский, продолжались и в последующие годы. Необходимо отметить работы Н.Н. Медникова в области математического моделирования процессов выемки и транспортирования горных пород [10]. Также в этом направлении велись исследования на кафедре Организации и управления в горной промышленности [11]. Но в этом направлении научная школа МГИ все же не заняла ведущих позиций.

Что касается применения методов оптимального управления и исследования операций, то, с одной стороны, они развивались применительно к задачам определения границ карьеров на основе полученного опыта в области моделирования горных работ в задачах проектирования, с учетом достижений зарубежных авторов в области построения специальных методов оптимизации для этой задачи. С.Д. Коробов не только их освоил, но и внес существенный вклад в их развитие. Это произошло во время его стажировки в Канаде, поэтому его научные результаты, представленные в докладе на международном симпозиуме APCOM-1973, сразу были замечены, а затем и использованы в зарубежных комплексах программ. Данное направление развивалось ряд десятилетий, в результате был развит метод параметрического анализа карьерного поля [12, 13, 14].

Хочется отдельно отметить результаты, которые были достигнуты на кафедре Организации и управления в

горной промышленности (созданной в 1967 г. под именем кафедры Исследования операций). Целью выполненных в середине 1960-х гг. в МИР-ГЭМ-МГИ исследований состояли в освоении и адаптация популярных подходов исследования операций к задачам горной промышленности. В качестве примеров решаемых задач можно указать задачи:

- планирования транспортных работ;
- определения оптимальных карьерных грузопотоков;
- определения оптимального расположения перегрузочных пунктов.

Первые итоги выполненных исследований были подведены в учебном пособии [15]. Впоследствии основное место при этом заняли не столько вопросы математического моделирования, сколько исследование задач текущего и оперативного планирования, а также задач организационного планирования и исследование вопросов реализации плана в условиях действия случайных возмущений [11, 16, 17, 18].

Между этими направлениями существовала и продолжает существовать определенная взаимосвязь, т.к. моделирование, как технологических процессов, так и горных работ находит применение в задачах исследования операций, характеристики процессов имеют значение для выбора параметров технологии горных работ, режим горных работ определяется не только пространственным положением залежи и ее качественными и количественными характеристика-

ми, но и используемыми комплексами оборудования и т.п. Говоря о взаимосвязи этих направлений нельзя не отметить вклад Виктора Владимировича Истомина, еще одного из учеников В.В. Ржевского, под руководством которого и личном участии выполнен целый ряд научно-исследовательских и квалификационных работ не только по отдельным направлениям, но и на их стыке. [19, 20, 21]

Из научных трудов по рассматриваемой тематике, изданных по инициативе В.В. Ржевского в 1960-е гг. и в начале 1970-х гг., видно, что его научное влияние далеко не ограничивалось рамками МИРГЭМ-МГИ, а распространялось гораздо шире. В.В. Ржевский в этом контексте видится как организатор научных исследований в масштабе всей страны. В частности, среди его соавторов можно заметить В.С. Хохрякова, долгие десятилетия развивавшего направление проектирования и моделирования открытых горных разработок в Свердловске-Екатеринбурге и одним из первых выдвинувшим концепцию геоинформатики, И.Б. Табакмана, основная часть научной карьеры которого прошла в Институте кибернетики с вычислительным центром АН Узбекистана и известного работой [4], А.Д. Школьникова.

Анализ исследований и работ последних лет свидетельствует о том, что многолетние традиции исследований, заложенные В.В. Ржевским, продолжают жить и сегодня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аналитические методы исследования и математическое моделирование горных процессов* / Под ред. проф. В.В. Ржевского.

го. М.: Гос. науч.-техн. издат. литературы по горному делу, 1963.

2. *Ржевский В.В., Школьников А.Д., Коробов С.Д.* Использование электронных вычис-

- лительных машин для планирования и управления технологическими процессами на карьерах. — М.: ЦНИИТЭИуголь, 1965. — 101 с.
3. *Проектирование*, планирование и управление производством на карьерах посредством ЭВМ / Под ред. В.В. Ржевского. М.: Недра, 1966. — 238 с.
4. *Табакман И.Б.* Принципы построения АСУ на карьерах. — Ташкент: Фан, 1977. — 140 с.
5. *Красильников В.Д., Коробов С.Д., Косачева Л.Н.* Модель месторождения руд черных металлов // Научные основы высокопроизводительных комплексно механизированных и автоматизированных карьеров. — М.: МГИ, 1971.
6. *Технологические* и системные основы автоматизированного проектирования открытых горных разработок / В.В. Ржевский, В.А. Горбатов, Н.Н. Медников, С.Д. Коробов, В.В. Истомин, В.В. Брагин // Проблемы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1988.
7. *Коробов С.Д.* Модель месторождения и расчет объемов в САПР открытых горных разработок // Обоснование параметров систем и комплексов горного оборудования открытых горных работ. — М.: МГИ, 1987. — С.75–80.
8. *Валуев А.М.* Горно-геометрическое моделирование в задачах проектирования открытых горных работ: Учебное пособие. — М.: МГИ, 1989. — 107 с.
9. *Варийчук М.И.* Исследование процессов производства вскрышных работ методами математического моделирования. Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. — М.: МГИ, 1969. — 196 с.
10. *Медников Н.Н.* Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ. Учебное пособие. — М.: МГТУ, 1996. — 156 с.
11. *Организация* и управление горным производством: Учебник для вузов/ В.И. Ганицкий, Д.Г. Даянц, М.А. Бурштейн и др.; под общ. ред В.И. Ганицкого. — М.: Недра, 1991.
12. *Коробов С.Д.* Метод параметрического анализа карьерного поля // Научные основы создания высокопроизводительных комплексно-механизированных и автоматизированных карьеров. — М.: МГИ, 1982.
13. *Korobov S.D.* Parametric analysis of open pit mines // Proceedings of the XXIV-th APCOM Symposium. Montreal, Quebec, Canada, 1993. — Vol.2. — P.57-66.
14. *Korobov S.D., Pastikhin D.* Parameterization of open pit contours on the cross-section basis // Proceedings of the 1st Regional APCOM Symposium. Ljubljana, Slovenia, 1994.
15. *Ржевский В.В., Резниченко С.С., Хронин В.В., Попов К.С.* Операционные исследования открытых разработок: Учебное пособие. — М.: МГИ, 1968. — 194 с.
16. *Резниченко С.С.* Математическое моделирование в горной промышленности. Учебное пособие для вузов, — М.: Недра, 1981.
17. *Ганицкий В.И.* Организация производства на карьерах. — М.: Недра, 1983.
18. *Петросов А.А.* Организация оперативного управления добычными работами. Учебное пособие. — М.: МГИ, 1986.
19. *Пастихин Д.В.* Обоснование направления развития горных работ на мощных железорудных карьерах. Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. — М.: МГТУ, 1996. — 149 с.
20. *Игнатов А.О.* Обоснование режима добычных и вскрышных работ при освоении коренных месторождений алмазов с мощной толщей покрывающих пород. Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. — М.: МГТУ, 2009. — 130 с.
21. *Багров Д.А.* Формирование и моделирование организационно-технологических схем горных работ на рудных карьерах. Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. — М.: МГТУ, 2009. — 139 с. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Валуев А.М. — доктор физико-математических наук, профессор кафедры Организации и управления в горной промышленности, amvaluev@online.ru
Пастихин Д.В. — кандидат технических наук, доцент кафедры Технология, механизация и организация открытых горных работ, msmu-orm@mail.ru
 Московский государственный горный университет
 Moscow State Mining University, Russia