

Научно-техническое сопровождение создания уникальных транспортных объектов (на примере Большой кольцевой линии Московского метрополитена)



Д. С. Конохов,
д-р техн. наук,
руководитель отдела
научно-технического
сопровождения
строительства
АО «Мосинжпроект»,



В. В. Вязовой,
директор
программы проектов
АО «Мосинжпроект»,



Р. А. Евтушенко,
директор проекта
АО «Мосинжпроект»,



Д. С. Петунина,
главный специалист
АО «Мосинжпроект»

В Своде правил 120.13330.2022 «Метрополитены» впервые в системе нормативно-технической документации РФ включен раздел 5.18.7 «Научно-техническое сопровождение строительства», направленный на обеспечение соблюдения требований федеральных законов «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», «О техническом регулировании» и «Градостроительный кодекс Российской Федерации».

В основе раздела о научно-техническом сопровождении строительства нового свода правил «Метрополитены» лежит опыт, накопленный в АО «Мосинжпроект» при создании крупных транспортных объектов класса КС-3, к которым, безусловно, можно отнести Большую кольцевую линию (БКЛ) Московского метро. Этот объект, введенный в эксплуатацию на всем его протяжении в марте 2023 г. — самый масштабный проект российского метростроения и один из крупнейших в мире. В его состав вошли 28 новых станций и 3 полностью реконструированных, 47 пересадок (в том числе перспективные), из них 19 — на радиальные линии существующего метрополитена.

В ходе строительства БКЛ накоплен уникальный опыт научно-технического сопровождения (НТС) строительных и проходческих работ в условиях действующего метрополитена.

Особой задачей строительства было обеспечение безопасности пассажирских перевозок на работающих линиях. Для каждого случая пересечения или примыкания к ним были разработаны специальные мероприятия с учетом прогнозируемого влияния, способов и инженерно-геологических условий строительства, а также технического состояния сооружений.

В числе самых сложных объектов были:

- пересадочный узел на ст. «Сокольники» Сокольнической линии —



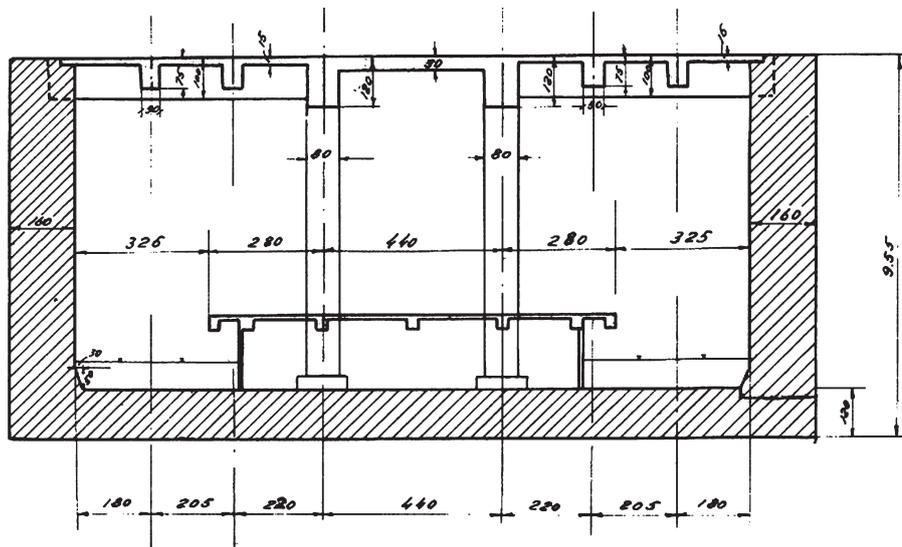


Рис. 1. Конструкция ст. «Сокольники» первой линии Московского метрополитена (чертеж 1933 г.)

первой линии Московского метрополитена. Эта станция — памятник архитектуры. На время строительства перегонных тоннелей организована система геотехнического мониторинга. Для сооружений примыкания строящейся станции к действующей закреплены грунты вплотную к стенам действующей станции;

- пересадочный узел на ст. «Печатники» Люблинско-Дмитровской линии — полуподземной станции, совмещенной с коллектором р. Нищенки и построенной в пойме р. Москвы в очень сложных геологических условиях. Под действующей станцией был проложен двухпутный тоннель, движение на эксплуатируемом участке закрыли и одновременно с проходкой вели подготовку строительства пересадочного узла (ремонт верхнего строения пути и демонтаж плит покрытия станции);

- ст. «Марьяна Роща», строящаяся с применением буровзрывного способа работ непосредственно под одноименной станцией Люблинско-Дмитровской линии — одной из самых глубоких станций Московского метро. Для ускорения работ указанным способом выполнены расчеты и проведены необходимые мероприятия для

обеспечения безопасности и комфортности движения пассажиров.

Учитывая сложность эксплуатационно-технических и инженерно-геологических условий Москвы и плотную городскую застройку (не только наземных объектов, но и уже существующей сети метрополитена), накопленный опыт НТС на указанных участках БКЛ представляет интерес для освоения подземного пространства крупных мегаполисов.

Перегонные тоннели под ст. «Сокольники»

Ст. «Сокольники» Сокольнической линии является одной из первых в Московском метро. Именно с нее 15 мая 1935 г. отправился первый поезд с пассажирами. Конструкция станции (рис. 1) трехпролетная, колонная, мелкого заложения. Она стала своего рода шаблоном для сооружения станций открытого способа работ.

Вмещающими грунтами служат насыпные грунты, представленные тугопластичными суглинками и песками с прослойками супеси и глины, со строительным мусором. Песок мелкий, пылеватый, водонасыщенный, с напорными водами в основании станционного сооружения.

Трасса БКЛ располагается под углом около 74° под сооружениями ст. «Соколь-

ники» в глинах, известняках и мергелях. Обделка тоннелей БКЛ на участке пересечения — высокоточная сборная железобетонная, диаметром 6 м. Проходка перегонных тоннелей осуществлялась тоннелепроходческими механизированными комплексами (ТПМК) Herrenknecht.

В ходе обследовательских работ было выявлено, что на ст. «Сокольники» на участке, попадающем в зону влияния строительства перегонных тоннелей БКЛ, имеется деформационный шов, из которого организован водоотвод.

Численное моделирование возможного влияния строительства на ст. «Сокольники» выполнено с учетом технического состояния станции и ее вестибюля, а также конструкции и состояния деформационного шва. При расчете учитывалась возможность взаимонезависимых смещений конструкций станции в зоне расположения шва. Результаты модельных исследований приведены в табл. 1.

Поскольку полученные модельными исследованиями величины осадок могли привести к возникновению перемещений в зоне осадочного шва, повреждению гидроизоляции станции, изменению продольного профиля путей и уклонов, что повлекло бы за собой нарушение эксплуатационной надежности ст. «Сокольники», она была закрыта для движения поездов на время строительства перегонных тоннелей с организацией НТС, включая следующие работы [1]:

- разработку технологического регламента на проходку перегонных тоннелей [2], в котором были описаны контролируемые параметры проходки, дана диаграмма давления пригруза забоя по всей трассе перегонных тоннелей, в том числе под действующей ст. «Сокольники». Рекомендованное давление пригруза в шельге свода составило 1,6 бара, в лотке — 2,3 бара;
- автоматизированный мониторинг планово-высотного положения конструкций ст. «Сокольники» с периодичностью 1 раз в 4 часа [3];

Таблица 1. Результаты расчета модельных исследований

Тоннельное сооружение	Расчетные смещения, мм		
	Горизонтальные	Вертикальные	Разность осадок*
В результате проходки левого перегонного тоннеля			
Станция «Сокольники» Сокольнической линии	1/2	12/11	1
Вестибюль станции «Сокольники» (с устройством буресекущихся свай)	2	2	1
В результате проходки левого и правого перегонных тоннелей			
Станция «Сокольники» Сокольнической линии	2/4	17/16	1

*Разница между вертикальными деформациями в зоне I и II станционных путей (для платформенной части станции).

- контроль высотного положения головки рельсов и разности перемещений рельсовых нитей с периодичностью 2 раза в сутки;

- контроль плано-высотного положения внутренних конструкций вестибюля ст. «Сокольники» с периодичностью 2 раза в сутки;

- визуальный контроль технического состояния сооружений метрополитена;

- геодезические наблюдения за деформациями дневной поверхности по оси проходки перегонных тоннелей;

- контроль и интерактивное управление технологическими параметрами проходки (давление пригруза, объем разработанного грунта, давление нагнетания и объем тампонажного раствора) по результатам геотехнического мониторинга [4].

Планируемый темп проходки перегонных тоннелей составлял 7 колец в сутки. Перед входом ТПМК в зону влияния на ст. «Сокольники» была выполнена технологическая остановка для технического обслуживания и проверки работоспособности систем комплекса, чтобы не допустить его остановки под действующей станцией.

Итоговые деформации ст. «Сокольники» по результатам проходки двух перегонных тоннелей и их сопоставление с результатами расчетов приведены в табл. 2.

По итогам работ можно сделать вывод, что проходка перегонных тоннелей БКЛ не повлияла на конструкции действующей ст. «Сокольники». В результате реализации мероприятий по НТС и контролю параметров проходки перегонных тоннелей достигнуты следующие результаты:

- максимальные стабилизированные осадки конструкций ст. «Сокольники» составили 3,6 мм;

- обеспечена безопасная, практически безосадочная проходка тоннелей БКЛ на глубине около 6 м под действующей станцией — объектом культурного наследия;

- не потребовались установка страховочных пакетов и их последующий демонтаж, гидроизоляция деформационного шва, которые могли бы повлечь за собой изменения облика исторического памятника и увеличение стоимости строительства объекта.

Станция «Печатники»

Ст. «Печатники» Люблинско-Дмитровской линии была построена открытым способом из монолитного железобетона и сборных железобетонных конструкций в 1995 г. Максималь-

Таблица 2. Деформации станции после проходки левого и правого перегонных тоннелей и стабилизации деформаций

Тоннельные сооружения	Расчетные		По результатам мониторинга	
	план	высота	план	высота
Ст. «Сокольники» Сокольнической линии	2/4	17/16	1	3,6
Вестибюль ст. «Сокольники» той же линии	2	2	-2,3	-4,3

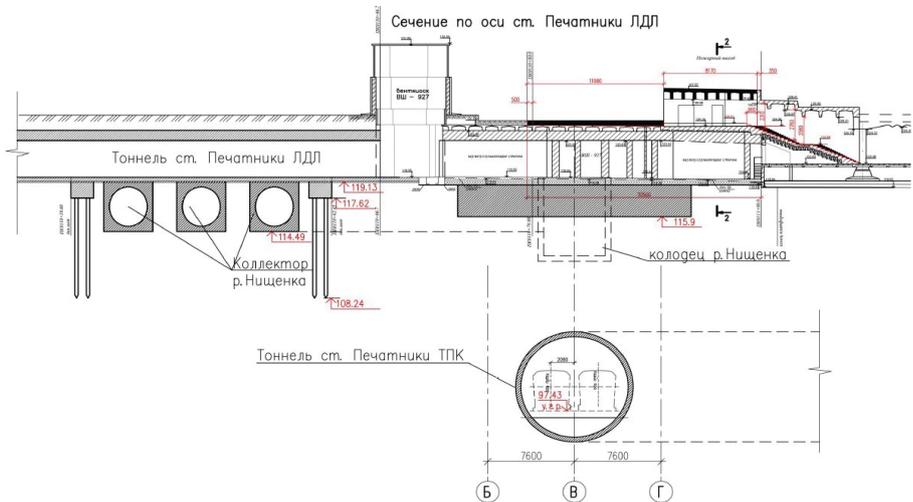


Рис. 2. Взаимное расположение существующей застройки и объектов строительства (разрез)

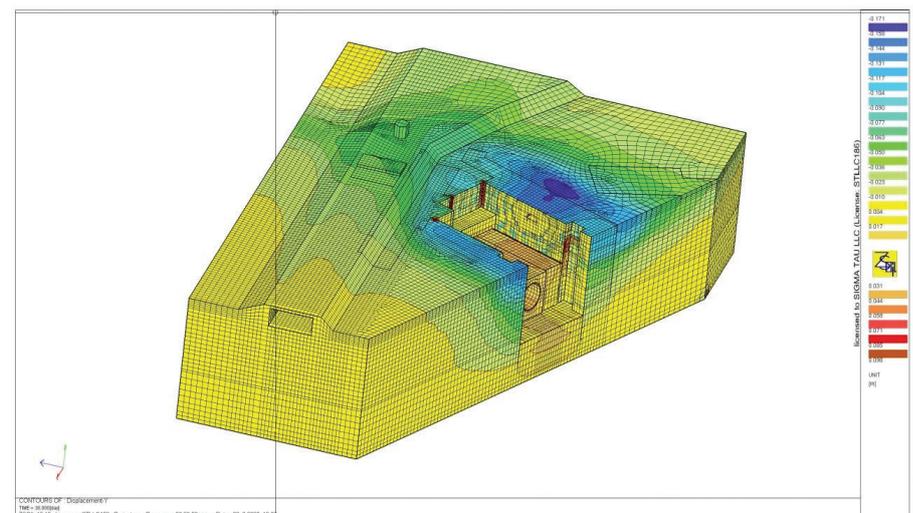


Рис. 3. Изополю вертикальных перемещений при проходке двухпутного перегонного тоннеля

ная глубина заложения от поверхности до покрытия станции составляет 1,5 м. При обследовании тоннеля были выявлены участки, на которых в процессе эксплуатации происходила просадка пути. Зафиксированная величина просадки составила от 15 до 31 мм.

Вмещающий грунтовый массив — техногенные отложения, суглинки и пески преимущественно средней крупности с крошкой и обломками кирпича, бетона, местами со щепой древесины, осколками стекла и кусками металла, слежавшиеся, малой и средней степени водонасыщения и водонасыщенные.

Под станцией проходит коллектор р. Нищенки, состоящий из трех сборных

железобетонных труб и шести камер (рис. 2). Фундаментами камер являются монолитные железобетонные плиты высотой 380 мм, глубина заложения от поверхности земли 7 м. Фундаменты под трубами коллектора — сборные железобетонные блоки с глубиной заложения 6,5–10,5 м от поверхности.

Строительство перегонного тоннеля от ст. «Печатники» до ст. «Нагатинский затон» велось ТПМК Herrenknecht с диаметром резания 10,69 м с активным грунтовым пригрузом забоя. Проходку перегонных тоннелей БКЛ под ст. «Печатники» вели на глубине 13,6 м в следующих инженерно-геологических условиях:

- сводовая часть — в юрских глинах твердой, прослоями полутвердой консистенции;

- средняя и нижняя части — в измайловских известняках средней прочности, с прослоями мергеля и глины, трещиноватых, прослоями разрушенных до щебня и муки, водоносных.

Гидрогеологические условия территории характеризуются наличием грунтовых вод надъярского и измайловского водоносных горизонтов.

Оценка влияния строительства двухпутного перегонного тоннеля на сооружения ст. «Печатники» Люблинско-Дмитровской линии и на коллектор р. Нищенки велась с учетом технического состояния станции, ее конструктивных особенностей, а также деформаций, полученных как в процессе эксплуатации, так и в результате работы по водопонижению при сооружении котлована ст. «Печатники» БКЛ [5].

Расчет проводили в программном комплексе «Z Soil» методом конечных элементов в объемной постановке (рис. 3). Результаты расчета приведены в табл. 3.

Минимальный расчетный коэффициент запаса прочности в конструкциях ст. «Печатники» после проходки двухпутного перегонного тоннеля составил 1,15.

На основании анализа имеющихся материалов были предложены следующие мероприятия по НТС и интерактивному управлению параметрами проходки [4]:

- верификация результатов численного моделирования [6];
- прогнозирование геотехнических рисков [7];
- фиксация параметров проходки (давление пригруза, объем разработанного грунта, давление нагнетания и объем тампонажного раствора);
- организация автоматизированного мониторинга плано-высотного положения конструкций ст. «Печатники» с периодичностью 1 раз в 3 часа;
- геодезические наблюдения за деформациями дневной поверхности;
- георадиолокационное обследование грунтового массива (рис. 4) с целью выявления протечек из коллектора р. Нищенки во время щитовой проходки [8];
- измерения по технологии радиоволновой геоинтроскопии межскважинного пространства (РВГИ) в зоне пересечения действующих и строящихся тоннельных сооружений [9];
- анализ результатов мониторингов и интерактивный контроль параметров проходки.

Таблица 3. Расчетные перемещения от проходки перегонного тоннеля

Объект	Максимальные перемещения конструкций станции, мм		
	Вертикальные	Вдоль станции	Поперек станции
Ст. «Печатники» Люблинско-Дмитровской линии	17,0	0	0
Железобетонные коллекторы р. Нищенки диаметром 3500 мм	39,0	–	–

В процессе проходки контролировали технологические параметры работы ТПМК и сопоставляли их с данными мониторингов. При необходимости в режиме реального времени корректировали давление пригруза ТПМК, что позволило обеспечить максимальную фактическую осадку ст. «Печатники» в размере 7,4 мм, а коллектора р. Нищенки — 4,2 мм (табл. 4).

Мероприятия по НТС и интерактивному управлению параметрами проходки позволили:

- вести контроль изменения физического состояния грунтового массива, технического состояния и деформаций защищаемых сооружений и принимать своевременные решения по корректировке технологических параметров работы ТПМК в режиме реального времени;
- обеспечить конструктивную надежность и дальнейшую безопасную эксплуатацию действующих сооружений ст. «Печатники» и коллектора р. Нищенки без применения дополнительных специальных методов строительства.

Станция «Марьина Роща»

Ст. «Марьина Роща» Люблинско-Дмитровской линии была открыта в 2010 г. По конструкции она пилонная, трехсводчатая, глубокого заложения (57 м), возведена закрытым способом по типовому проекту.

Обделка станции — сборная чугунная, круглого сечения. Наружный диаметр боковых станционных тоннелей 8,5 м, среднего станционного тоннеля — 9,5 м. Расстояние между осями тоннелей 9,75 м. Пилоны расположены в два ряда, расстояние между осями пилонов 10,5 м. Ширина пилона 6,759 м, проема — 3,759 м, платформы — 19,1 м.

Северный вестибюль с эскалаторным тоннелем открыт в 2012 г. Конструкция тоннелей — железобетонная водонепроницаемая обделка из высокоточных блоков диаметром 10,6 м.

Конструкция ст. «Марьина Роща» БКЛ — пилонного типа с проемными участками шириной 3,755 м и пилонами 6,759 м. Средний тоннель построен в чугунной обделке диаметром 9,5 м.

Таблица 4. Сопоставление расчетных и фактических осадок ст. «Печатники» и коллектора реки Нищенки

Тоннельные сооружения	Осадки, мм	
	Расчетные	Фактические по результатам мониторинга
Ст. «Печатники» Люблинско-Дмитровской линии	17,0	7,4
Коллектор р. Нищенки	39,0	4,2



Рис. 4. Схема измерений по технологии радиоволновой геоинтроскопии межскважинного пространства (f = 625 кГц)

Боковые тоннели выполнены в чугунной обделке диаметром 8,5 м. Между боковым и средним тоннелями расположены 22 проема. Строительство велось закрытым способом через рабочие кабельные стволы.

В профиле станция расположена на глубине около 73 м от поверхности земли и находится ниже пересекаемых тоннелей за ст. «Марьино Роцца» Люблинско-Дмитровской линии приблизительно на 5 м.

Тоннельные конструкции ст. «Марьино Роцца» БКЛ размещаются в устойчивых отложениях верхнекаменноугольного возраста мещеринского, перхуровского, неверовского, ратмировского и воскресенского ярусов, представленных перемежающимися слоями глин известковых, твердых, с прослоями мергелей; мергелей трещиноватых средней прочности; известняков трещиноватых средней прочности, с прослоями прочных и малопрочных мергелей и глин.

Для сооружения ст. «Марьино Роцца» БКЛ перпендикулярно действующей ст. «Марьино Роцца» (рис. 5) были проложены пилот-тоннели с применением щитовых ТПМК Herrenknecht, оснащенных активным грунтовым пригрузом. Обделка тоннелей на участке пересечения — сборная из чугунных тубингов диаметром 6 м.

Параллельно со строительством пилот-тоннелей было начато сооружение среднего станционного тоннеля встречными забоями. Из подходящих

выработок устроены монтажные камеры укладчиков тоннельной обделки, выполнен монтаж станционного укладчика.

Проект предусматривал разработку породы станционного тоннеля буровзрывным способом вне зоны эксплуатируемого метрополитена, под действующим станционным комплексом — установкой типа Brokk.

При проходке станционных тоннелей под эксплуатируемыми сооружениями за ст. «Марьино Роцца» Люблинско-Дмитровской линии для предотвращения осадок ее конструкций в своде сооружаемых тоннелей проектом предусматривалась опережающая цементация породы. После набора прочности цементным раствором приступали к разработке породы с устройством набрызг-бетонной крепи.

На время проходки перегонных тоннелей под действующим станционным комплексом строительство среднего станционного тоннеля было остановлено. Забой закрепляли с помощью анкеров и набрызг-бетона.

После завершения работ по строительству среднего станционного тоннеля и пилот-тоннелей строители приступили к переборке боковых пилот-тоннелей с диаметра 6 м под проектный диаметр 8,5 м. Проходку вели в трещиноватых известняках с прослоями твердой глины прочностью на одноосное сжатие до 70 МПа. Учитывая высокую прочность породы и опыт проходки среднего станционного тон-

неля, был сделан вывод, что разработка грунта горным способом с применением установки типа Brokk увеличивает сроки строительства. Для ускорения работ перешли на буровзрывной способ в зоне действующих сооружений метрополитена. При этом были разработаны специальные мероприятия для обеспечения безопасности и комфортности пассажирских перевозок.

В основу обеспечения сейсмобезопасных условий производства работ положено ограничение допустимой скорости колебаний в основании охраняемого объекта [10, 11]. Для всех подземных объектов, расположенных в районе производства взрывных работ, в том числе инженерных систем ст. «Марьино Роцца», допустимая скорость колебаний была принята 30 мм/с.

Аналитически были рассчитаны допустимые по сейсмическому действию массы мгновенно взрывааемых зарядов в зависимости от расстояния до конструкций ст. «Марьино Роцца». Максимальная масса зарядов ($Q_d = 4,3$ кг) была ограничена исходя из воздействия на наземные объекты (строительство велось на глубине 61 м), расположенные в районе производства взрывных работ (табл. 5).

Минимальное расстояние от мест планируемого проведения буровзрывных при переборке пилот-тоннелей в технической зоне ст. «Марьино Роцца» до конструкций самой станции составило 9 м, до кабельных коллекторов — 6,74 м, а в зоне влияния станции — до конструкций станции — 5,57 м и до кабельных коллекторов — 7,5 м.

Затем был выполнен геотехнический прогноз влияния строительства станции «Марьино Роцца» БКЛ на действующие сооружения метрополитена с учетом этапности проходки (табл. 6). Были получены расчетные перемещения действующих сооружений, на основании которых было дано заключение о возможности строительства объекта.

На все время строительства ст. «Марьино Роцца» БКЛ была организована система автоматизированного мониторинга действующих сооружений Люблинско-Дмитровской линии [12]. Измерения планово-высотного положения конструкции станции проводилось с периодичностью 1 раз в 4 часа.

В итоге благодаря применению буровзрывного метода разработки породы и метода встречных забоев сроки

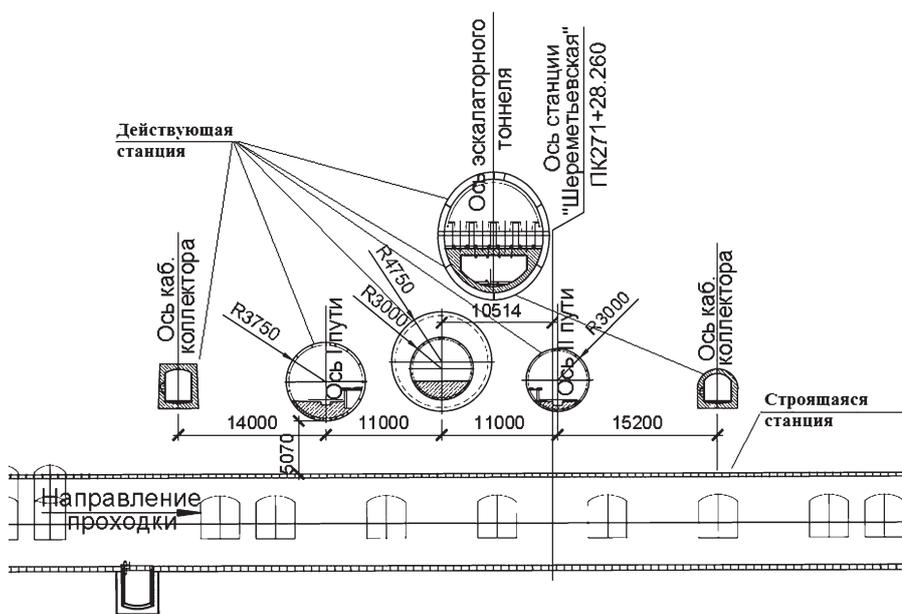


Рис. 5. Взаимное расположение станций «Марьино Роцца» БКЛ и Люблинско-Дмитровской линии (продольный разрез)

Таблица 5. Сейсмобезопасные массы мгновенно взрывааемых зарядов при переборке станционных пилот-тоннелей строящейся ст. «Шереметьевская»

Расстояние от места взрыва до конструкции ст. «Марьяна Роща» r , м	5,5–7	7–8	8–9	9–10	10–12	12–15	15–17	17–20	20–22	22–25	25 и более
Допустимая масса мгновенно взрывааемых зарядов Q_d , кг	0,067	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,9	1,4	2,2	3,0	4,3

Таблица 6. Величины прогнозируемых и фактических вертикальных перемещений конструкций ст. «Марьяна Роща» Люблинско-Дмитровской линии

Тоннельные сооружения	Строительство перегонных тоннелей		Строительство ст. «Марьяна Роща» БКЛ	
	Расчетные перемещения	Фактические перемещения	Расчетные перемещения	Фактические перемещения
Левый перегонный тоннель за ст. «Марьяна Роща», 1-й путь	6	-4,5	11,0	-11,1
Правый перегонный тоннель за ст. «Марьяна Роща», 2-й путь	6	-1,3	11,0	-12,0
Натяжная камера ст. «Марьяна Роща» (северный вестибюль)	3	-2,6	2,0	-7,0
Эскалаторный тоннель (северный вестибюль)	4	-2,6	6,0	-7,0

строительства боковых станционных и среднего тоннелей ст. «Марьяна Роща» БКЛ удалось сократить на 25%.

Кроме того, разработанные мероприятия (автоматизированный мониторинг, расчет массы заряда и минимально безопасного расстояния) позволили обеспечить безопасность пассажирских перевозок на действующей линии без закрытия станции и других ограничений.

Выводы

Научно-техническое сопровождение при строительстве Большой кольцевой линии позволило:

- разработать и апробировать аналитический метод верификации результатов математического моделирования при выполнении геотехнических расчетов;
- разработать методику расчета коэффициента технологического перебора грунта при применении механизированной проходки тоннелей;
- контролировать изменения физического состояния грунтового массива, технического состояния и деформаций защищаемых сооружений и принимать своевременные решения по корректировке технологических параметров работы ТПМК в режиме реального времени;
- разработать и внедрить в практику подземного строительства современные методы автоматизированного мониторинга и интерактивного управления параметрами горнопроходческих работ;
- обеспечить конструктивную надежность и безопасную эксплуатацию действующих сооружений Московского метрополитена во время строитель-

ства БКЛ без применения специальных методов строительства;

- сократить сроки и стоимость проходческих работ.

Опыт, полученный при строительстве Большой кольцевой линии, поможет дальнейшему развитию подземного пространства г. Москвы, а также других мегаполисов мира. ■

Источники

1. Конюхов Д. С. Интерактивное управление технологическими параметрами проходки двухпутного перегонного тоннеля метрополитена // ГИАБ. 2022. № 5. С. 84–94.
2. Mazein S. V., Pankratenko A. N., Polyankin A. G., Sharshova E. A. Soil improvement in tunnel face using foam reagents in EPB TBM // Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art / Eds. Peila, Viggiani & Celestino. London: Taylor & Francis Group, 2019. P. 2663–2670.
3. Merkin V. E., Pichugin A. A., Medvedev G. M. et al. Comprehensive Automated Geotechnical Monitoring System and Experience in its Application in the Construction of Underground Facilities // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2021. No. 58 (3). P. 230–236.
4. Konyukhov D. S. Safety of existing buildings during underground mining // Mining Inform. Anal. Bull. 2022. No. 8. P. 158–167.
5. Знаменская Е. А., Зерцалов М. Г. Исследование влияния щитовой проходки тоннеля метрополитена на окружающую городскую застройку // Инновации и инвестиции. 2022. № 6. С. 167–170.

6. Kulikova E. Yu., Konyukhov D. S., Potokina A. M., Ustinov D. V. Analytical method for calculating the coefficient of technological soil sampling in the organization of mining and construction works with the use of mechanized tunneling // Mining Inform. and Anal. Bull. 2022. No. 6. P. 305–315.
7. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Complex estimation of geotechnical risks in mine and underground construction // Sustainable Development of Mountain Territories. 2023. No. 15 (1). P. 7–16.
8. Чуркин А. А., Капустин В. В., Конюхов Д. С., Владов М. Л. Последние изменения в российской практике нормативного регулирования «технической геофизики» // Геотехника. Т. XIII, № 2. С. 56–70.
9. Кузнецов Н. М. Способ 3D-обработки данных радиоволнового просвечивания межскважинного пространства // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1(19). С. 240–246.
10. Верхованцев А. В., Шулаков Д. Ю., Дягилев Р. А. Особенности оценки сейсмического воздействия буровзрывных работ // Горный журнал. 2019. № 5. С. 29–36.
11. Вохмин С. А., Курчин Г. С., Кирсанов А. К., Шкаруба Н. А. Расчет параметров буровзрывных работ при строительстве подземных горных выработок. Красноярск: СФУ, 2022. 180 с.
12. Simutin A. N., Deineko A. V., Zertsalov M. G. Experience of Using the Home-Made Monitron Automated Hydrostatic-Leveling System for Monitoring of Hydraulic Structures // Power Technol. Eng. 2021. No. 55 (4). P. 482–486.